

整体加筋壁板轴压强度设计方法

闫亚斌¹, 陈群志², 王建邦¹, 李超¹

(1. 中航飞机股份有限公司西安飞机分公司, 西安 710089; 2. 北京航空工程技术研究中心, 北京 100076)

摘要: 基于 Johnson-Euler 公式建立了中长柱整体加筋壁板压缩强度工程计算方法, 经过 7050 铝合金整体加筋壁板的轴向压缩试验验证是合理的, 压缩失稳载荷计算误差满足设计要求。在整体加筋壁板总面积相同的条件下, 压缩失稳载荷随蒙皮与长桁的面积比 λ 增加呈现出先增加后降低的变化规律, 据此通过调整 λ 可获得整体加筋壁板较佳的设计方案。

关键词: 整体加筋壁板; 中长柱; Johnson-Euler 公式; 压缩强度; 失稳载荷

中图分类号: V214.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2013)02-0102-05

Integrally Stiffened Panel Design Method of the Axial Compressive Strength

YAN Ya-bin¹, CHEN Qun-zhi², WANG Jan-bang¹, LI Chao¹

(1. AVIC Aircraft Corporation Xi'an Aircraft Company, Xi'an 710089; 2. Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100076)

Abstract: The whole stiffened panels of medium-length column compressive strength engineering algorithms are established based on the Johnson-Euler formula. The axial compression test of the whole stiffened panels with 7050 aluminum alloy is verified to be reasonable. The compression collapsing load calculation error meets the design requirements. With the same whole stiffened panel area, the compression collapsing load first increases and then decreases with increasing ratio of the skins and stringers area λ . Better design can be obtained by adjusting the λ of the whole stiffened panels.

Key words: integral stiffened panels; medium-length column; Johnson-Euler formula; compressive strength; collapsing load

0 引言

飞机整体加筋壁板是指不需铆接、胶接、焊接和螺接技术将蒙皮、长桁以及加强部分制成一体的加筋板结构。整体加筋壁板具有结构重量轻、密封性好、装配简单等优点。从 20 世纪 50 年代开始整体壁板就应用在飞行器结构上, 当代歼击机机翼平均有 78% (运输机平均有 65%) 的结构采用了整体结构, 而其中 87% 为整体壁板。在应用初期, 整体壁板尺寸较小, 一般为 1.5 m × 3.5 m, 随着制造技术进步和现代化设备发展, 整体壁板的尺寸愈来愈大, 目前已达到 1.9 m × 31.15 m。

整体加筋壁板的常见截面形式有“T”形、“工”字形和“Z”形 3 种, 如图 1 所示。“T”形截面容易加工成形, 但在剖面面积相同的情况下, 比其他形式剖面的惯性半径小, 材料利用率较低; “工”字形截面筋条的腹板不易加工, 且厚度不应小于 3 mm, 壁板成形较困难, 但是其剖面惯性半径大, 临界破坏应力高; “Z”形截面筋条腹板较易加工, 在相同剖面面积情况下, 其惯性半径最大^[1]。

从结构强度的角度, 能否满足稳定性和损伤容限要求是整体加筋壁板设计需要解决的关键问题。文中采用工程算法和试验验证相结合的方法, 选取“T”型截面的整体加筋壁板为对象, 研究

收稿日期: 2013-01-29; 修回日期: 2013-03-02

作者简介: 闫亚斌(1979-), 男(汉), 陕西眉县人, 工程师, 本科; 研究方向: 飞机结构强度

网络出版日期: 2013-03-22 17:35; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130322.1735.002.html>

引文格式: 闫亚斌, 陈群志, 王建邦, 等. 整体加筋壁板轴压强度设计方法 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(2): 102-106.

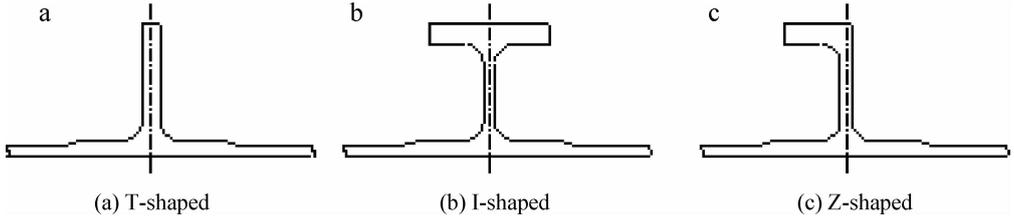


图 1 整体壁板截面形式^[1]

Fig. 1 Integral panel section forms

对其承受轴压载荷下的稳定性强度设计方法。

整体加筋壁板在轴压载荷作用下的破坏形式与长细比 L'/ρ 密切相关,按照 L'/ρ 的取值范围可分为短柱 ($L'/\rho \leq 20$)、中长柱 ($20 < L'/\rho < 60$) 和长柱 ($L'/\rho \geq 60$) 3 种结构形式。 L'/ρ 取值不同时,结构的破坏形式与破坏机理不尽相同,因而其设计准则也不相同。对于长柱和中长柱而言,结构发生失稳所对应破坏应力称为临界破坏应力,简称临界应力,可采用欧拉公式计算求出;对于短柱通常将材料的屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 作为结构发生失稳的临界应力。因此,整体加筋壁板结构稳定性设计中,短柱通常以 $\sigma_f \geq \sigma_{0.2}$ 作为临界应力,而中长柱和长柱则根据欧拉公式计算结果来确定临界应力。长柱在飞机整体加筋壁板中并不常见,短柱结构形式的设计方法比较成熟。中长柱是飞机整体加筋壁板的主要结构形式,但就其稳定性强度设计方面还缺少工程实用的计算分析方法。为此,文中着重针对中长柱整体加筋壁板结构的压缩强度工程计算方法进行研究。

1 中长柱的压缩载荷计算

整体加筋板受压时,在载荷的初始施加阶段,主要是桁条承受载荷,随着载荷增加,蒙皮逐步参与受载,这样将整体加筋板的受压问题转化为几个柱受压的情况,因而可将蒙皮等效为柱切面的一部分来考虑。计算方法如下。(表 1 为主要的计算符号)

1.1 Johnson-Euler 法(约翰逊-欧拉法)

整体加筋壁板的临界应力可以采用 Johnson-Euler 公式^[2]计算:

$$\sigma = \sigma_f - (L'/\rho)^2 \cdot \sigma_f / 4\pi^2 E \quad (1)$$

式中: $L' = L/\sqrt{C}$, $\rho = \sqrt{I_{\min}/A}$ 。

1.2 采用板元法计算型材压损应力 σ_f

采用板元法计算型材压损应力 σ_f 的计算步

表 1 符号说明

Table 1 Symbol description

Symbol	Meaning
L'	Effective length of stiffened panel
C	End support factor
P_s	Collapsing Loads
n	Number of stringers
λ	Skin and stringers area ratio
t_s	Skin thickness
t_f	Established tendon boss thickness
ρ	Combination cross-sectional radius of gyration
I_{\min}	Minimum moment of inertia for combining cross-section
A	Effective combination of sectional area
N	Total number of the profile plate element
W	Skin equivalent width
b_i	Width of the i -th plate element
δ_i	Thickness of the i -th plate element

骤如下:①把型材剖面划分为若干个板元,如图 2 所示;②按图 3 计算各板元的压损应力 σ_{fi} ;③按公式 $\sigma_f = \sum_{i=1}^N (b_i \cdot \delta_i \cdot \sigma_{fi}) / \sum_{i=1}^N (b_i \cdot \delta_i)$ 计算整个组合剖面的压损应力 σ_f 。

1.3 蒙皮等效宽度的确定

蒙皮等效厚度可如下公式求得:

$$W = \begin{cases} 1.9t \sqrt{E/\sigma} & (t \geq 3.175 \text{ mm}) \\ 2.375t \sqrt{E/\sigma} & (3.175 \text{ mm} > t > 2.54 \text{ mm}) \\ 2.4t \sqrt{E/\sigma} & (t \leq 2.54 \text{ mm}) \end{cases} \quad (2)$$

蒙皮厚度取法如图 4 所示,对于图 4(a), $t = (t_s + t_f)/2$;对于图 4(b),取 $W/2$ 的宽度计入筋条有效面积。

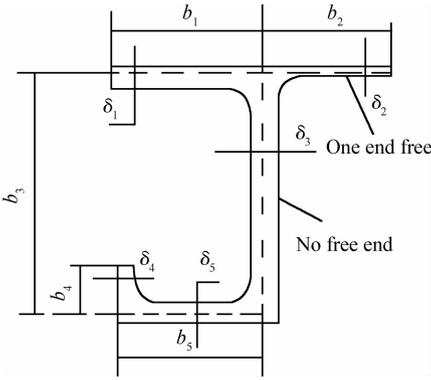


图2 挤压型材剖面划分的板元^[3]

Fig.2 Extrusion profiles profile divided plate element^[3]

1.4 整体加筋壁板压缩临界载荷的确定

整个加筋壁板的压缩临界载荷 $P_s = \sigma \times A \times n$

1.5 整体加筋壁板压缩临界应力计算步骤

① 用板元法计算型材的压损应力 σ_f ; ② 计算加筋板的有效长度 L' ; ③ 假设 $\sigma = \sigma_f$, 计算蒙皮的等效宽度 W ; ④ 计算筋条和有效蒙皮剖面的回转半径和有效剖面面积; ⑤ 计算压缩失稳应力 σ 。重复步骤③~⑤, 直到两次计算的压缩失稳应力 σ 之差满足工程精度要求, 这时的 σ 即为所求。再利用 2.4 节的公式可以得到整个加筋板的压缩临界载荷。

2 整体加筋壁板压缩强度试验验证

2.1 整体壁板结构设计与试验件

选取 7050-T7451 铝合金材料进行整体壁板结构设计、压缩失稳载荷计算与试验验证, 材料的主要成分^[4] (质量分数/%): Si(0.12)、Fe(0.15)、Cu(2.0~2.6)、Mn(0.10)、Mg(1.9~2.6)、Cr(0.04)、Zn(5.7~6.7)、Ti(0.06)、Zr(0.08~0.15)等, 余量为 Al。

首先设计了 6 种整体壁板结构, 这些壁板均包含 1 个肋间距和 3 个长桁间距, 且有效长度相同, 其横截面示意图见图 5, 几何参数见表 2。这些壁板长细比均介于长柱与短柱之间, 属于中长柱。在此基础上, 对 6 种整体壁板结构进行压缩失稳载荷计算, 并依据其中 4 种整体壁板横截面几何参数加工了 4 组试验件进行轴向压缩强度试验, 每组 4 件。

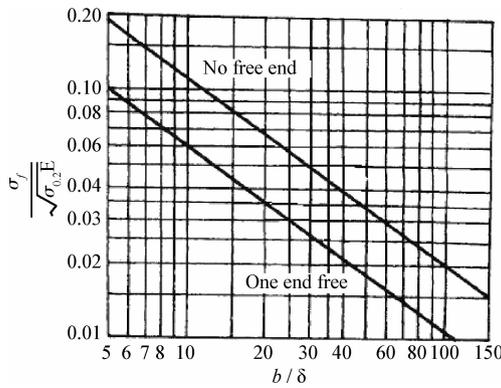


图3 铝合金型材剖面板元压损应力计算曲线^[2]

Fig.3 Aluminum extrusions profile plate element stress calculation pressure loss curve^[2]

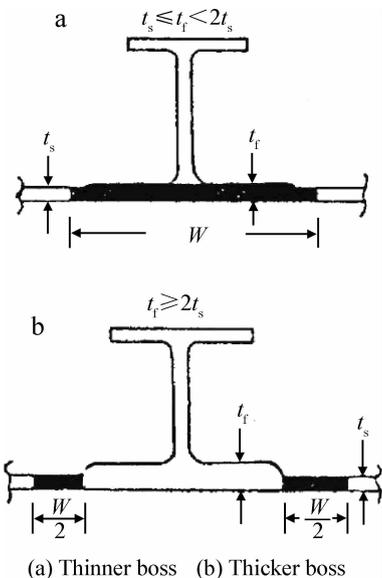


图4 整体加筋壁板蒙皮等效宽度取法^[3]

Fig.4 Integral stiffened panels skin equivalent width of the emulated^[3]

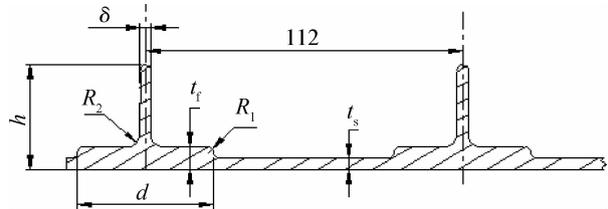


图5 整体壁板结构设计的横截面示意图

Fig.5 Cross section of the integral panels design

2.2 压缩失稳载荷计算结果

压缩试验前, 按照 2.1 给定的半经验 Johnson-Euler 公式对上述 6 种整体加筋壁板的压缩失稳载荷进行计算, 计算时将蒙皮等效宽度作为柱切面的一部分来分析, 计算结果见表 3。

表 2 整体壁板结构设计的横截面参数/mm

Table 2 Design parameters of the cross-section of integral panels structure

Sample No.	h	d	t_f	t_s	δ	R_1	R_2	λ
1	36	38	4.8	2.6	4.8	10	5	1.25
2	36	38	4.8	2.8	4.5	10	5	1.45
3	36	38	4.8	3.0	4.2	10	5	1.68
4	36	38	5.0	3.1	3.8	10	5	1.83
5	36	38	5.0	3.4	3.4	10	5	2.29
6	36	38	5.3	3.5	2.9	10	5	2.49

Note: No. 2 to 5 machining the test; No. 1 and 6 only used for buckling calculate and no machining test.

表 3 试验件压缩失稳载荷计算结果

Table 3 Calculation results of the test piece compressed the instability load

Sample No.	Total cross-sectional area /mm ²	Collapsing stress/MPa	Collapsing Loads/kN
1	2 077	313.5	651.1
2	2 048	319.0	653.3
3	2 055	325.0	667.9
4	2 059	334.0	687.7
5	2 077	327.2	679.6
6	2 055	320.4	658.4

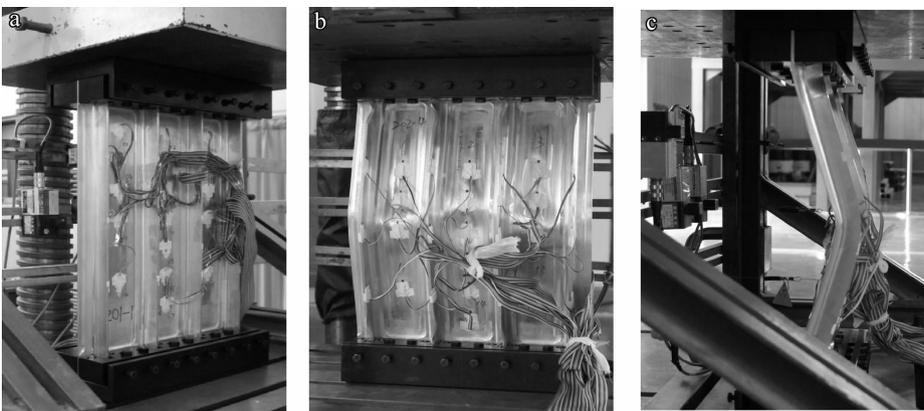
表 4 试验件压缩试验结果

Table 4 Compression results of the test pieces

Sample No.	λ	Collapsing loads/kN	Average collapsing loads/kN	Dispersion coefficient/%
2	1.45	792	768.3	2.17
		764		
		764		
		753		
3	1.68	775	780.5	0.81
		786		
		786		
		775		
4	1.83	807	802.0	0.72
		807		
		797		
		797		
5	2.29	775	793.8	2.01
		786		
		807		
		807		

2.3 轴压试验结果

轴压试验在常温下进行,试验件的压缩试验结果见表 4,试验件压缩试验失稳破坏前后的情况见图 6。



(a) Before compressing test (b) Surface after compression failure (c) Side after compression failure

图 6 整体加筋壁板试验件压缩试验破坏前后现场照片

Fig. 6 Scene photos of overall stiffened wall test pieces before and after compression failure

2.4 计算结果与试验结果对比分析

表5和图7给出了7050-T7451铝合金整体加筋壁板压缩失稳载荷的试验结果与计算值。

由图7可以看出,计算结果与试验数据曲线趋势一致,整体加筋壁板的压缩失稳载荷随 λ 增加呈现出先增加后降低的变化规律,当 $\lambda = 1.83$ 时达到最大值。据此,在设计时可通过调整 λ 值来获得整体加筋壁板较佳的设计方案。

典型铝合金整体加筋壁板压缩试验与计算结果之间存在14.2%~14.9%的相对误差。之所

以二者存在一定差异,是由于Johnson-Euler公式的约束边界条件介于简支与固支之间所致^[5-6],而为了保证压缩试验过程中试验件不产生侧滑,在试验件两端增加了防侧滑夹具,试验支持条件近似于固支,从而引起试验件两端刚度增加,导致压缩失稳载荷试验值大于计算值^[7]。但整体加筋壁板压缩失稳载荷的计算误差仍然能够满足设计要求,说明文中所建立的整体加筋壁板压缩失稳强度工程计算方法是合理的,能够较准确地预测整体加筋壁板压缩强度。

表5 7050-T7451 铝合金整体加筋壁板压缩失稳载荷的计算值与试验结果对比

Table 5 Calculated and experimental results of compression instability load of 7050-T7451 aluminum alloy

Sample No.	1	2	3	4	5	6
Collapsing load (Experiment)/kN		768.3	780.5	802	793.8	
Collapsing load (Calculating)/kN	651.1	653.3	667.9	687.7	679.6	658.4
Relative error/%		14.9	14.4	14.2	14.4	

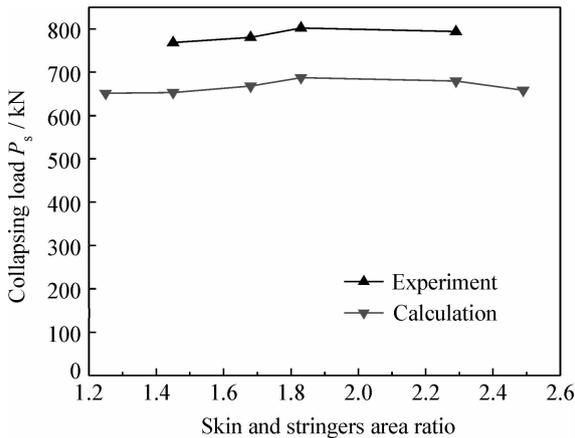


图7 7050-T7451 铝合金整体加筋壁板压缩失稳载荷

Fig. 7 Collapsing load of 7050-T7451 aluminum alloy

3 结论

(1) 基于Johnson-Euler公式建立了中长柱整体加筋壁板结构轴向压缩强度工程计算方法,经过典型铝合金整体加筋壁板的轴向压缩试验验证是合理的,压缩失稳载荷的计算误差能够满足设计要求。

(2) 典型铝合金整体加筋壁板压缩试验与计算结果表明,在整体加筋壁板总面积相同的条件

下,压缩失稳载荷随 λ 增加呈现出先增加后降低的变化规律。在整体加筋壁板设计时,可通过调整 λ 来获得较佳的设计方案;或者在满足结构承载能力的前提下可实现结构减重。

参考文献

- [1] 飞机设计手册总编委会. 飞机设计手册(第10册)结构设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.
- [2] 孙侠生. 民用飞机结构强度刚度设计与验证指南[M]. 北京: 航空工业出版社, 2012.
- [3] 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, 2001.
- [4] 工程材料实用材料手册编辑委员会. 工程材料实用材料手册(第2版)第3卷[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [5] 牛春匀. Airframe Stress Analysis and Sizing 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.
- [6] 刘斌, 张保, 孙秦. 加筋壁板整体屈曲极限承载能力研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(12): 1977-80.
- [7] 王海燕, 童贤鑫. 轴压加筋壁板承载能力计算方法探讨[J]. 航空工程进展, 2012, 3(3): 305-310.

作者地址: 陕西西安阎良区140信箱148分箱 710089

中航飞机股份有限公司西安飞机分公司

Tel: (029) 8684 6183

E-mail: ybqx99@sina.com