

文章编号:1674-8190(2019)S1-062-05

# 轴压载荷下薄壁整体壁板强度设计

闫亚斌, 丁伟

(中航西飞民用飞机有限责任公司, 西安 710089)

**摘要:** 在最佳设计面积比的情况下, 整体壁板的设计可以得到较高的结构承载能力, 但是对于整体壁板, 蒙皮与筋条分离面的确定给实际设计工作造成很大障碍。为解决以上问题, 对蒙皮厚度在 2.5~3.5 mm 范围内的“T”形整体壁板, 在截面面积相同的条件下给定分离面位置, 以最大失稳载荷为设计目标, 得到蒙皮与筋条的最佳设计面积比。结果表明: 以此面积比设计的厚蒙皮“T”形整体壁板其承受轴压载荷的能力最强。

**关键词:** 整体壁板; 面积比; 轴压载荷

中图分类号: V214

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.S1.012

## The Strength Design for Thin Skin of Integral Plate under Compression Load

Yan Yabin, Ding Wei

(AVIC XAC Commercial Aircraft Co., Ltd., Xi'an 710089, China)

**Abstract:** In the case of optimum design in ratio of the area, higher load of the structure about integral panel design can be obtained. But for the integral panel, it is difficult to establish the separation surface position between the skin and stiffeners in the practice design. To solve the problem the research work has been done. The skin thickness is from 2.5mm to 3.5 mm. The cross section of stiffener is “T” shaped. Under the same conditions for a given separation surface position, the optimum design for the skin and stiffener area ratio is obtained. Result shows that the integral panel with such an area ratio is the strongest to subject the axial compression load.

**Key words:** integral stiffened panels; the ratio of the area; axis compression load

## 0 引言

飞机结构设计、分析以及试验等技术是飞机设计的关键技术之一, 而民用飞机对高舒适性、高安全性、高可靠性以及经济性的高追求, 使得结构效率、寿命、可维修性等因素成为民用飞机设计的重要关注点。因此研究应用整体壁板结构是提高民用飞机各项性能指标的有效途径之一, 掌握并灵活运用整体壁板设计技术已成为衡量飞机结构设计水平高低的关键因素。

所谓整体壁板结构是指不经过铆接、胶接、焊接和螺接等普通连接技术而将蒙皮和支撑结构生产成整体的加筋壁板结构。由于整体壁板与铆接壁板相比, 具有结构重量轻、密封性好、装配协调简单等众多优势, 一直以来是世界各航空公司研究和应用的方向。

国外飞机设计研究主要集中在波音和空客等飞机主制造商, 他们在前期的基础研究领域投入的人力、财力以及物力相对较多, 通过长期的技术储备和知识积累, 形成了一套较为先进的设计体系。1996 年美国 NASA 开始实施整体机体结构计划

收稿日期: 2018-12-21; 修回日期: 2019-03-01

通信作者: 闫亚斌, 78522687@qq.com

引用格式: 闫亚斌, 丁伟. 轴压载荷下薄壁整体壁板强度设计[J]. 航空工程进展, 2019, 10(增刊 1): 62-66.

Yan Yabin Ding Wei. The strength design for thin skin of integral plate under compression load[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(S1): 62-66. (in Chinese)

IAS,针对飞机关键部位开展了整体结构的设计分析与试验研究,其研究成果在 Boeing747 改进型的飞机设计过程中得到了大范围应用,取得了非常显著的经济价值<sup>[1-3]</sup>。既保证了民用飞机结构的高安全性、高可靠性、高经济性以及长寿命等需求,又解决了飞机设计中相互矛盾的诸多方面问题,比如重量与强度的矛盾、经济性与可靠性的矛盾等。

随着我国现代化制造水平的飞跃,目前国内整体壁板的供应尺寸已经有了质的突破,能够满足飞机主受力构件的尺寸需求。但是对于整体壁板的设计,国内有参考价值的研究成果非常少,以至于长期以来飞机设计人员进行整体壁板设计时主要的参考资料还是一些通用的设计资料,而这些参考资料中,作为整体壁板(只包含一根筋条的单块式壁板)的设计,研究表明:在蒙皮与桁条的压缩失稳应力相等的情况下,桁条剖面积与蒙皮剖面积最佳比值约为 1.4;但是在无凸缘的整体壁板的结构设计中,最佳比值约为 1.7<sup>[4-5]</sup>。但是作为整体壁板结构,在确定桁条剖面积与蒙皮剖面积时,没有参考文献给出明确的定义,因此研究飞机整体壁板的应用迫在眉睫,而分离面的确定成为整体壁板设计过程中的关键控制点。

由于“T”形截面的整体壁板机械加工简单,加工成本低,因此整体壁板设计时该截面常常会被作为首选截面,本文就以此为研究对象开展“T”形整体壁板的设计研究。对蒙皮厚度在 2.5~3.5 mm 范围内的“T”形整体壁板,在截面面积相同的条件下给定分离面位置,以最大失稳载荷为设计目标,得到蒙皮与筋条的最佳设计面积比。

## 1 “T”形整体壁板分离面的确定

整体壁板的设计以提高剖面的惯性半径  $\rho$  为原则, $\rho$  越大,壁板的承载能力就越高。而对于本文研究的“T”形整体壁板,蒙皮与长桁的分离面位置至少要有三种以上<sup>[6-7]</sup>,如图 1 所示。

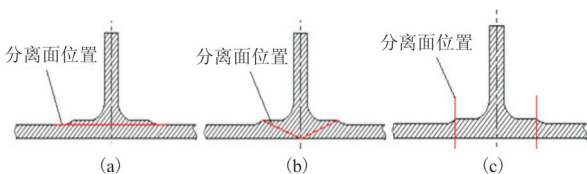


图 1 “T”形整体壁板的分离面位置

基于此设计难点,从实际工程需求出发,在进行“T”形整体壁板设计时,假定其分离面如图 2 所示,在此设计条件下开展“T”形整体壁板的设计研究工作。

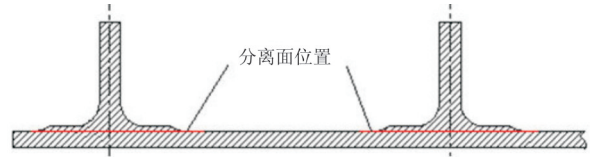


图 2 假定的蒙皮与长桁分离面位置

## 2 “T”形整体壁板的设计

在一定的失稳载荷前提下按照结构重量(即总截面积)相同的原则开展“T”形整体壁板的设计工作,综合考虑载荷量级、翼盒空间、加工制造、试验费用及周期等因素的影响<sup>[8-9]</sup>,对该整体壁板明确以下要求:

- (1) 失稳载荷大于 550 kN;
- (2) 蒙皮厚度介于 2.5~3.5 mm 之间,筋条高度为 36 mm;
- (3) 蒙皮与筋条面积比按四种面积比进行;
- (4) 外形按平板考虑;
- (5) 研究试件大小为 1 个肋间距、3 个长桁间距的整体壁板。

按照上述限制条件,在给定的分离面位置下开展蒙皮和筋条的尺寸优化设计,共设计了四种不同面积比的整体壁板截面如图 3 所示,详细的截面参数如表 1 所示。

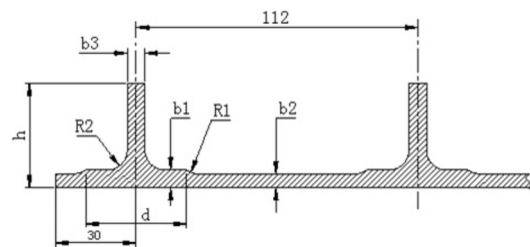


图 3 整体壁板截面

表 1 设计的整体壁板截面参数

序号	b1	b2	b3	总截面积	面积比
1	4.8	2.8	4.5	1 806	1.45
2	4.8	3.0	4.2	1 806	1.68
3	5.0	3.1	3.8	1 802	1.83
4	5.0	3.4	3.4	1 807	2.29

注:  $h=36$ ,  $d=38$ ,  $R1=10$ ,  $R2=5$ , 长度单位为 mm。

为了保证试验的顺利进行以及试验数据的有效性,对试验件边界进行了适当处理:

(1) 为了防止发生侧边效应,在试验件设计时将侧边蒙皮进行了适当延长;

(2) 考虑到加载和约束的需要,将试验件沿轴向向外进行了适当延伸。

### 3 有限元计算

对于本次研究的整体壁板结构通过分析采用了能够反映壁板弯曲效应的平面弯曲板 (QUAD4) 元素建立了分析用有限元计算模型。有限元模型及坐标示意如图 4 所示。

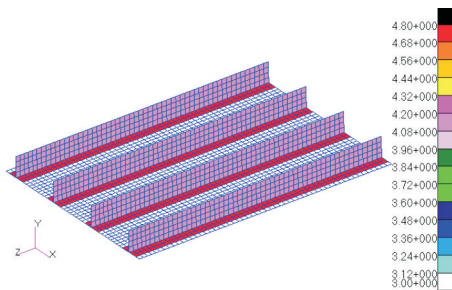


图 4 有限元模型图及坐标

模型在两端面施加相应载荷后采用对称约束,应用 Lanczos 向量法通过 Nastran 软件的失稳分析模块对壁板进行特征值法分析。四种试验件失稳载荷计算结果如表 2 所示。一阶失稳模态云图如图 5~图 8 所示。

表 2 各截面组成的壁板失稳载荷

序号	特征载荷	失稳载荷/kN	特征值云图	蒙皮与筋条面积比
1	9156	540	图 5	1.45
2	9516	561	图 6	1.68
3	9705	573	图 7	1.83
4	9792	579	图 8	2.29

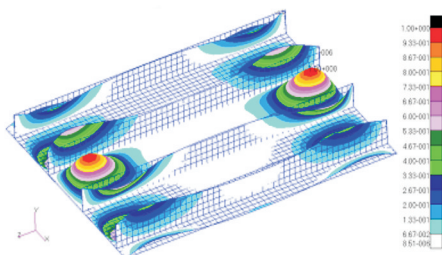


图 5 1号试验件特征值云图

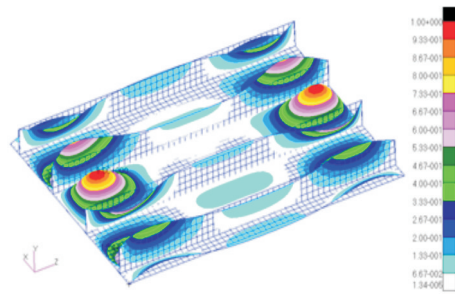


图 6 2号试验件特征值云图

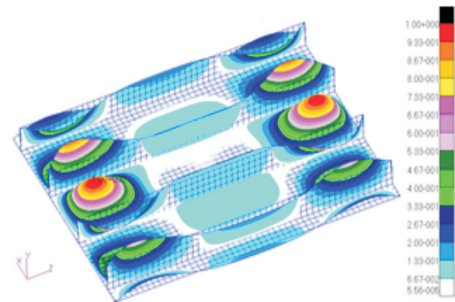


图 7 3号试验件特征值云图

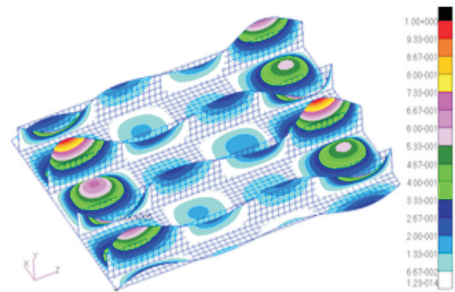


图 8 4号试验件特征值云图

通过计算分析可以得到:随着载荷量级的增大试验件首先发生局部失稳,直至试验件破坏失去承载能力。根据计算结果,其最大失稳载荷约为 577.8 kN。由于本计算采用的是材料线性失稳模块,未引入非线性分析,所以设计的整体壁板结构实际承载能力应大于该计算值。

### 4 轴压试验验证

轴压试验在常温下进行<sup>[10-11]</sup>,试验失稳破坏前后的情况如图 9 所示,试验件的压缩试验结果如表 3 所示,典型部位的载荷—应变曲线如图 10 所示。

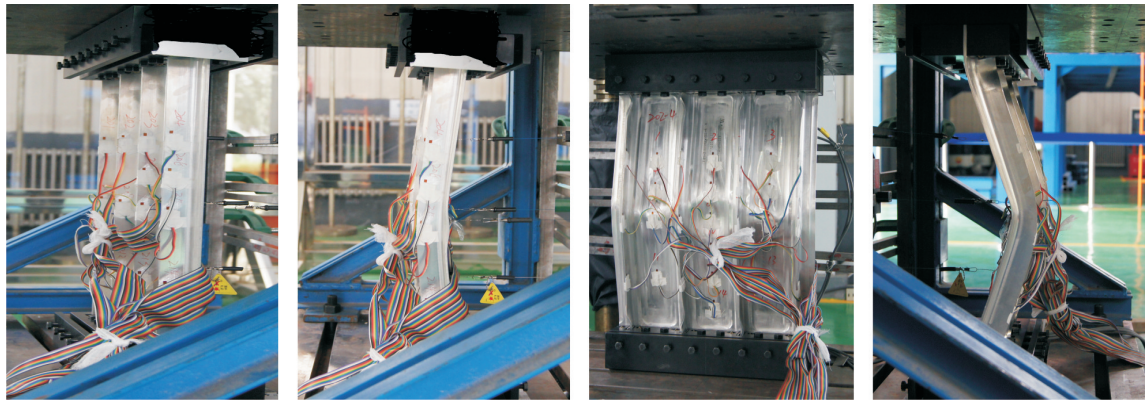


图 9 “T”形整体壁板试验破坏前后现场照片

表 3 “T”形整体壁板轴压试验结果

序号	失稳载荷/kN	破坏载荷/kN	蒙皮与筋条面积比
1	768	813	1.45
2	780	820	1.68
3	802	851	1.83
4	794	844	2.29

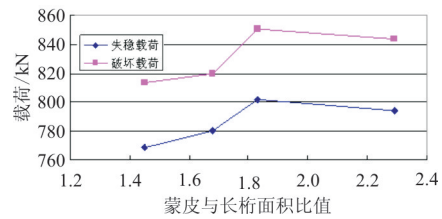
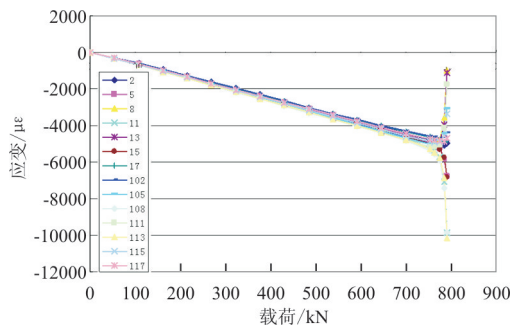
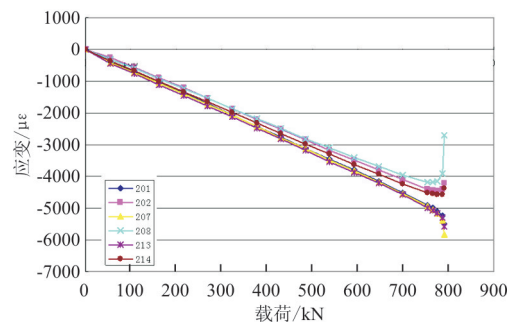


图 11 面积比对失稳和破坏载荷的影响



(a) 蒙皮



(b) 长桁

图 10 典型部位的载荷—应变曲线

### 5 结果分析

失稳和破坏载荷随蒙皮与长桁面积比的变化曲线如图 11 所示。

从图 11 可以看出:蒙皮与长桁面积比对失稳载荷与破坏载荷的影响趋势一致,当蒙皮与长桁面积比从 1.45 增大到 1.68 时,失稳/破坏载荷略有增加;从 1.68 增大到 1.83 时,失稳/破坏载荷增加幅度较大;从 1.83 增大到 2.29 时,失稳/破坏载荷略有下降。

有限元计算结果和试验结果如表 4 所示,它们的比较曲线如图 12 所示。从图 12 可以看出:有限元计算结果以及试验结果的数据曲线趋势一致,均是随着面积比的增加逐步增大,当面积比达到 1.83 时,整体壁板的失稳载荷最大;随后随着面积比的进一步增大失稳载荷逐渐减小;有限元计算结果比试验值低 30%左右,相对偏保守。

表 4 计算值与试验值比较

序号	失稳载荷/kN		相对误差	面积比
	有限元计算结果	试验结果		
1	540	768	-0.30	1.45
2	561	780	-0.28	1.68
3	573	802	-0.29	1.83
4	579	794	-0.27	2.29

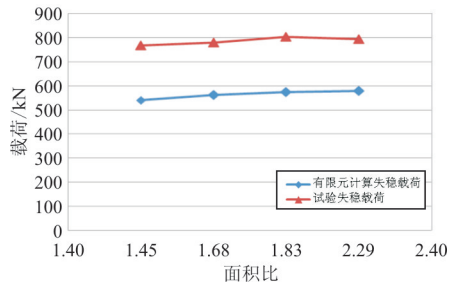


图 12 整体壁板轴压失稳载荷的计算与试验结果比较

通过分析,试验结果偏大的原因主要是试验支持状态的影响。因为纯简支状态属于不稳定状态,而纯固支状态与实际情况偏离较大,因此,试验夹具设计时在侧边增加了防侧移限位装置,而这种试验支持条件更接近于固支,最终造成试验载荷值偏大。

总之,通过对表 3 所列的数据分析,虽然有限元计算结果与试验值存在一定的误差,但是在缺少有效的试验数据支撑条件下,其也能满足工程计算的需要。

## 6 结束语

由于整体壁板的设计本身就是一个比较复杂的问题,要求在获得较高承载能力的前提下尽可能的减轻结构重量,这本身就是一个矛盾的论题。而限于时间和经费的要求,本文在获取最佳蒙皮与长桁面积比时所取的子样数量有限,只是从设计方法上给出了整体壁板的设计思路。后续需加大蒙皮与筋条面积比的取样数及范围,以扩大工程设计的应用范围。根据试验研究结果可以用于指导工程实际设计工作。

## 参考文献

- [1] Munroe J, Wilkins K, Gruber M. Integral Airframe Structures(IAS)-Validated Feasibility Study of Integrally Stiffened Metallic Fuselage Panels for Reducing Manufacturing Costs[R], NASA/CR-2000-209377, 2000.
- [2] 朴春雨, 章怡宁. 典型加筋板的优化设计[J]. 飞机设计, 2003(4): 29-32.
- [3] Bushnell D. Theoretical basis of the PANDA computer program for preliminary design of stiffened panels under combined in-plane loads[J]. Computers and Structures, 1987, 27(4): 541-563.
- [4] 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.
- [5] 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): 1977-1980.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 崔德刚. 结构稳定性设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1996.
- [9] 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): 305-308.
- [10] 孙为民, 童明波, 董登科, 等. 加筋壁板轴压载荷下后屈曲稳定性试验研究[J]. 实验力学, 2008, 23(4): 333-338.
- [11] 廖江海, 陈先民, 董登科. 整体加筋壁板轴压稳定性试验与分析[J]. 结构强度研究, 2014(2): 7-10.

## 作者简介:

闫亚斌(1979—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞机结构强度设计。

丁伟(1992—),男,硕士,助理工程师。主要研究方向:飞机结构强度设计。

(编辑:沈惺)