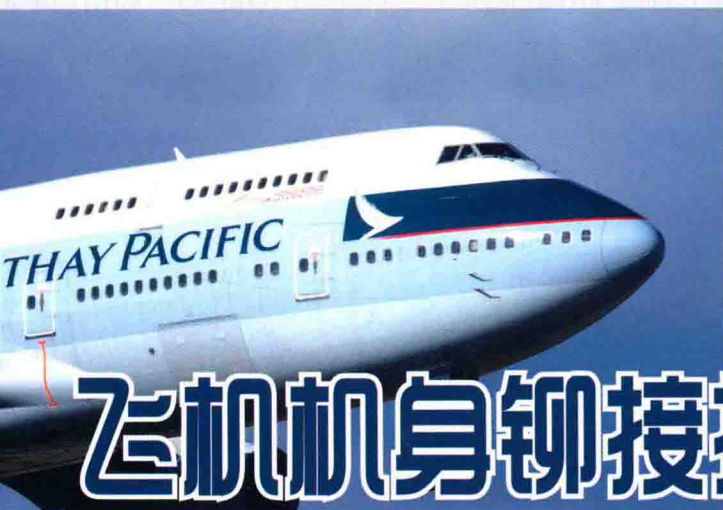




R

Riveted Lap Joints in Aircraft Fuselage Design, Analysis and Properties



飞机机身铆接搭接接头 设计与性能

[波兰] Andrzej Skorupa Malgorzata Skorupa 著
于佳 钟业盛 史丽萍 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

飞机机身铆接搭接接头 设计与性能

**Riveted Lap Joints in Aircraft Fuselage
Design, Analysis and Properties**

[波兰] Andrzej Skorupa Malgorzata Skorupa 著
于佳 钟业盛 史丽萍 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2013-140 号

图书在版编目(CIP)数据

飞机机身铆接搭接接头设计分析与性能/(波)斯克鲁普(Skorupa, A.),
(波)斯克鲁普(Skorupa, M.)著;于佳,钟业盛,史丽萍译.

—北京:国防工业出版社, 2015.3

书名原文: Riveted lap joints in aircraft fuselage - design, analysis and properties
ISBN 978-7-118-09907-2

I. ①飞... II. ①斯... ②斯... ③于... ④钟... ⑤史... III. ①机身 -
铆接 - 接头 - 研究 ②机身 - 搭接 - 接头 - 研究 IV. ①V261.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 037751 号

Translation from English language edition:

*Riveted Lap Joints in Aircraft Fuselage - Design,
Analysis and Properties*

by Andrzej Skorupa and Malgorzata Skorupa

ISBN 978-94- 007- 4281-9

Copyright © 2012 Springer Netherlands

Springer Netherlands is a part of Springer Science + Business Media

All Right Reserved

版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 17 $\frac{3}{4}$ 字数 315 千字

2015 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 62.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

译者序

大型军用运输机是一个国家武装力量攻防战略不可缺少的基本装备。对于运输机的制造者和使用者,运输机上密封增压机身的疲劳问题是非常关键的问题。对于大多数的运输机,疲劳发生在连接处,特别是在铝合金板之间的搭接接头处,甚至会严重威胁运输机的安全性。所以搭接接头的疲劳问题已经成为飞机结构设计中的基本问题,原著整理了大量国外运输机增压机身铝合金薄板铆钉搭接接头性能的资料,以及在大型运输机连接设计中获得的实际经验。引用大量资料阐述了机身铆钉搭接结构疲劳破坏的危险性与措施,列举了铆接搭接接头疲劳性能的多种理论假设,以及载荷条件下对其结构的影响因素,并对连接结构的疲劳力学特性进行了分析,详细描述了试验结果与理论预测的对比分析。

随着航空技术的飞速发展,我国非常重视军用运输机的作用,并大力发展军用运输机。长寿命、高可靠性和低维修成本的综合要求,成为现代大型军用运输机结构设计必须遵循的重要准则。本书为运输机连接结构设计及其铆接搭接接头的疲劳性能分析和疲劳寿命预测与可靠性计算提供理论支撑,为我国大型军用运输机结构设计提供重要的学术理论和工程应用价值。

本书可供装备管理机关和论证、研制、生产部门的管理人员和工程技术人员使用,也可作为高等院校研究生、本科生的教学参考书。

我与哈尔滨工业大学的钟业盛老师、史丽萍老师共同完成翻译与校对工作。十分感谢哈尔滨工程大学的曹家浩、赵宇坤、马晓亮、李亮星、陈虢、何飞翔、陈秦等研究生,哈尔滨工业大学的孙阳、霍阳阳、王信涛与潘殿坤等研究生。同时十分感谢国家自然科学基金的资助(批准号:51102059)。由于大家的共同努力,这本书得以顺利完成,我在这里表示衷心感谢。

于佳
2014年10月

序 言

目前,运输机主要承担运输旅客与货物的任务,而对于运输机的制造者和使用者,运输机上密封增压机身的疲劳是非常关键的问题。主要体现在:如何保证每一架飞机中每一个部件都有足够长的使用寿命;如何确定与不同结构的兼容性,并有足够的安全性;如何满足个别运输机的特定需求,并制定相应的检查程序。以上这些问题,包括损伤容限问题,都要在运输机维护适航性的文件中进行阐述。对于大多数的运输机,疲劳发生在连接处,特别是在铝合金板之间的搭接接头处,甚至会严重威胁运输机的安全性。这一事实早在 20 世纪 50 年代就已经确认了。所以搭接接头的疲劳已经成为飞机结构设计中的基本问题,而且也是飞机运营商重点详细检查的问题。为了减重,飞机制造业与航空公司都希望使用薄板材料。而且,基于飞机生产经济性的考虑以及日益复杂的检查程序都要求延长飞机的使用寿命。搭接接头的疲劳在售后服务中也是必须要考虑的问题,有些飞机的使用寿命已经超过 20 年。

增压机身上铝合金薄板铆接搭接接头的疲劳问题是本书的研究重点,不考虑胶接的情况。由于生产工艺、质量控制和检测技术的限制,接头的疲劳现象没有重大突破。近年来,采用可焊接技术制造的整体加筋铝合金结构,可以替代搭接接头结构。但这种连接结构长期服役的数据还没有得到,目前还在统计中。

铆钉连接的疲劳响应取决于接头数量、生产技术以及使用载荷等综合效应。在本书中关于铆接搭接接头的理论观点主要来源于文献报道。本书分为 10 章。第 1 章主要介绍机身蒙皮连接结构设计基础与载荷条件。机身搭接接头中的应力分布是十分复杂的,文献中大部分试验数据都是采用小试样搭接接头单向拉伸测试得到的。第 2 章介绍在真实结构中铆接接头试验结果的相关性。结果表明,制造工艺直接影响铆接搭接接头的疲劳性能。第 3 章主要介绍影响因素,包括板的材质、铆钉种类与材质以及制造工艺。制造工艺涉及铆接方法、铆钉孔缺陷、板材的表面处理和挤压力。后者是影响铆接接头疲劳性能的主要因素。第 4 章主要讨论设计参数对疲劳性能的影响,包括铆钉行数、铆钉行距、行内间隔、铆接模式以及板材厚度等参数。第 5 章介绍机械紧固搭接接头中载荷传递的数值模拟和试验结果。重点介绍弹簧扣件与连接板材摩擦力之间的载荷传递的试验研究与理论计算,连接处重叠区域的偏心距引起的次弯曲现象。第 6 章

介绍次弯曲的简单分析模型、有限元计算和测量方法。另外还介绍了次弯曲对接头疲劳性能的影响。第7章主要介绍纵向搭接接头中疲劳裂纹的形成与发展过程,重点是挤压力对疲劳模式的影响与磨损对疲劳裂纹生成过程的影响。介绍了纵向铆接搭接接头中典型且非常危险的疲劳破坏模式,即多点损伤(MSD)破坏模式。在第8章中首先阐述了由于MSD引起的客机灾难性事故。其次,对全尺寸机身面板上铆接搭接接头处的MSD试验结果进行了分析。第9章阐述铆接搭接接头的疲劳裂纹扩展和疲劳寿命预报方法,包括MSD问题。总结了常用的模型和程序,以及铆钉孔周边裂纹应力强度因子的求解方法,引入等效初始裂纹尺寸的概念来预测产品质量。第10章主要介绍机身结构中铆接搭接接头剩余强度的预测,考虑失效准则和裂纹扩展方向准则。阐述铆钉连接板剩余强度的多种估算方法,对预测与试验结果进行了分析比较。介绍了适用于MSD的铆接接头结构风险分析方法。每一章的主要问题都在每章最后一节进行了概述小结。本书中有各种丰富的插图。

命名规则

符号

α 未穿透裂纹的深度	R 应力比或机身半径
c 裂纹长度	R_{TR} 载荷传递比
D 铆钉驱动头的直径	r 铆钉孔半径
D_0 铆钉杆直径	S 外加应力或名义应力
d 铆钉孔直径	S_b 名义弯曲应力
dc/dN 疲劳裂纹扩展速率	S_{LO} 剥离应力
d_e 扩孔直径	S_{sq} 挤压应力
E 板材材料的弹性模量	S_u 极限抗拉强度
E_f 紧固件材料的弹性模量	S_y 屈服应力
e 加载路径离心率	s 行内铆钉间隔
F_{cl} 夹持力	T_{BP} 路旁载荷
F_{sq} 挤压力	T_{BR} 轴承载荷
F_u 剪切强度	T_{FR} 摩擦力
f 铆钉的灵活性,或者载荷的频率	T_{TR} 传递载荷
H 铆钉驱动头的高度	t 板材厚度
H_0 铆钉初始长度(凸头铆钉)	w 弯曲挠度或试样宽度
h 埋头孔深度	δ 铆钉挠度
he 扩孔系数	μ 摩擦系数
K 盈利强度因子	ν 泊松比
K_b 弯曲系数	ψ_c 临界裂纹张开角
M 弯曲力矩	σ_b 局部弯曲应力
N_f 疲劳寿命	$\sigma_{LINK-UP}$ 裂纹连通发生时的外加应力
P 外加拉伸载荷	σ_r 残余径向应力, 剩余强度
p 铆钉行距或压力	σ_θ 残余切向应力

下标

a 振幅

m 平均

max (min) 疲劳循环中的名义应力或应力强度因子的最大或最小水平

op 疲劳循环中的名义应力或应力强度因子的裂纹张开水平

缩略词

CA 恒幅(constant amplitude)

CGR 疲劳裂纹扩展速率(fatigue crack growth rate)

CTOA 裂纹尖端张角(crack tip opening angle)

CW 冷加工(cold working)

EIFS 等效初始裂纹尺寸(equivalent initial flaw size)

EPFM 弹性塑性断裂力学(elastic - plastic fracture mechanics)

FE 有限元(finite element)

LEFM 线弹性断裂力学(linear elastic fracture mechanics)

MSD 多点损伤(multiple - site damage)

POF 失效概率(probability of failure)

PSC 平面应变核心(plane strain core)

PZL 塑性区连通(plastic zone link - up)

SB 次弯曲(secondary bending)

SIF 应力强度因子(stress intensity factor)

SSD 单点损伤(single - site damage)

SY 条带屈服(strip yield)

TTCI 裂纹形成时间(time to crack initiation)

VA 变幅(variable amplitude)

单位和换算系数

1 英尺 = 0.3048m

1 英寸 = 25.4mm

1ksi = 6.8948MPa

1psi = 6.8948kPa

1lb = 0.4536kg

1ksi $\sqrt{\text{英寸}}$ = 1.099MPa $\sqrt{\text{m}}$

目 录

第 1 章	密封增压飞机机身的铆接搭接连接	1
1.1	机身蒙皮结构的构造解决方案	1
1.2	纵向搭接接头的载荷情况	3
1.3	胶接和铆接胶接接头	6
1.4	纵向互搭接头的疲劳破坏	7
1.5	本章小结	7
第 2 章	密封增压机身中纵向搭接接头与实验室搭接接头试样的疲劳性能差异	9
2.1	应力分布与试样几何形状	9
2.2	加载频率与环境条件的影响	18
2.3	本章小结	21
第 3 章	影响铆接搭接接头疲劳性能的生产变量	22
3.1	板材	22
3.2	紧固件类型和材料	27
3.3	制造工艺	35
3.3.1	铆接法	35
3.3.2	铆钉孔的缺陷	38
3.3.3	铆钉孔的冷加工	40
3.3.4	板材的表面处理	41
3.3.5	挤压力	45
3.4	本章小结	80
第 4 章	影响搭接铆接头疲劳性能的设计参数	81
4.1	铆钉行数	81
4.2	铆钉行距	84

4.3	行内铆钉间距	86
4.4	铆钉距板边缘的距离	87
4.5	铆接样式	88
4.6	板材厚度	89
4.7	尺寸效应	90
4.8	本章小结	91
第5章	机械紧固件的搭接接头的载荷传递	92
5.1	板材轴向力的简单计算	92
5.2	紧固件的柔性	95
5.2.1	分析解	96
5.2.2	试验测量	97
5.3	载荷传递的测量结果	105
5.4	摩擦力	107
5.5	本章小结	115
第6章	机械紧固接头偏心距产生的次弯曲	116
6.1	次弯曲现象	116
6.2	调查分析	117
6.2.1	模型	117
6.2.2	搭接接头的典型应用	121
6.3	有限元模型	127
6.4	次弯曲的测量	130
6.4.1	方法	130
6.4.2	测量值与计算值的比较	132
6.4.3	参数研究	135
6.4.4	现场测量结果	138
6.5	存在次弯曲连接接头的疲劳特性	140
6.5.1	次弯曲对疲劳寿命的影响	140
6.5.2	结合处表面状态的影响	145
6.6	本章小结	146
第7章	铆接接头中失效的初始位置及其形态变化——试验进展	148
7.1	破坏的初始位置	148

7.1.1	静载荷	148
7.1.2	疲劳载荷	150
7.2	磨损的作用	156
7.2.1	磨损现象	156
7.2.2	有磨损存在的破坏	158
7.3	疲劳裂纹的形貌发展	160
7.4	本章小结	166
第 8 章	铆接接头的多点损伤——试验观测	167
8.1	MSD 导致的飞机灾难性事故实例	167
8.2	MSD 的试验研究	171
8.2.1	多点损伤与单点损伤	171
8.2.2	铆接力对 MSD 的影响	176
8.2.3	双向载荷下的 MSD	178
8.2.4	机身面板的 MSD 试验	180
8.2.5	机身设计对 MSD 的影响	190
8.2.6	弯曲、过载和轻负载对 MSD 的影响	192
8.2.7	铆接修复的接头的疲劳行为	193
8.2.8	新旧飞机上的 MSD 的处理方法	194
8.3	本章小结	196
第 9 章	铆接搭接的疲劳裂纹扩展和疲劳寿命的预测	198
9.1	引言	198
9.2	裂纹扩展预测模型	198
9.3	应力强度因子的求解	202
9.4	等效初始裂纹尺寸	209
9.5	MSD 裂纹扩展预测	218
9.6	疲劳寿命的预测	222
9.7	本章总结	223
第 10 章	机身结构中铆接接头剩余强度的预测	225
10.1	引言	225
10.2	裂纹搭接和失效准则	225
10.2.1	塑性区裂纹搭接准则	226

10.2.2	弹塑性断裂力学失效准则	231
10.3	裂纹扩展方向准则	235
10.4	数值计算的进展情况	238
10.5	自相似裂纹扩展下机身搭接接头剩余强度的预测结果与 试验结果的比较	243
10.5.1	平板	243
10.5.2	曲板	245
10.6	撕裂带对裂纹路径影响的观测结果与预测结果的比较	252
10.7	结构性风险分析	254
10.8	本章小结	257
参考文献		259

第 1 章 密封增压飞机机身的铆接搭接连接

1.1 机身蒙皮结构的构造解决方案

现代运输机机身是蒙皮骨架结构,如图 1.1 所示。蒙皮骨架结构承受飞行载荷与座舱增压载荷。桁条直接铆接、黏接或点焊固定在蒙皮上,如图 1.2 所示。为了更好地连接蒙皮与隔框,通常采用两种连接方案:一种情况是周向的连接

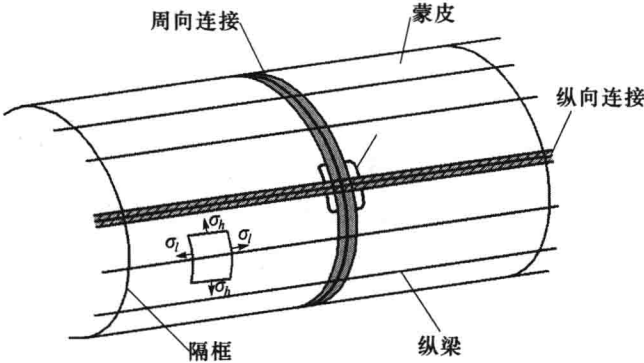


图 1.1 机身蒙皮结构的构件

接,直接连接到蒙皮与止裂带(tear straps,也称失效安全带 fail-safe strap);另一种情况如图 1.3 所示,通过加强板(stringer clips)连接桁条与隔框。这种情况称作浮动的隔框。内部止裂带如图 1.4 所示,经常位于两个隔框之间,将蒙皮裂纹的纵向力转变为周向力。如果这种情况发生在止裂带上,使蒙皮向后弯曲产生裂缝。这种现象称为“上下摆动”(flapping),是安全故障模式,将失效限制在受影响的区域(Kosai 等,1992)。薄蒙皮比厚蒙皮更容易发生(Maclin, 1991)。关于上下摆动现象的更多信息可以在 Swift (1987) 所著文献中找到。本书中只对我们关心的方面对其进行深入讨论。止裂带可以承受破裂蒙皮的载荷。止裂带应用在了好几种飞机上,但只从工艺角度来讲,止裂带是不受欢迎的。有时,黏接在蒙皮上的华夫格加强片可用来替代失效安全带,如图 1.5 所示。Schijve (1990)报道了不同类型的止裂带(有一体结构的、铆接的、铰接的;由 2024-T3 和 7075-T6 铝合金、钛合金以及 ARALL 材料制成)阻滞裂纹扩展的能力。

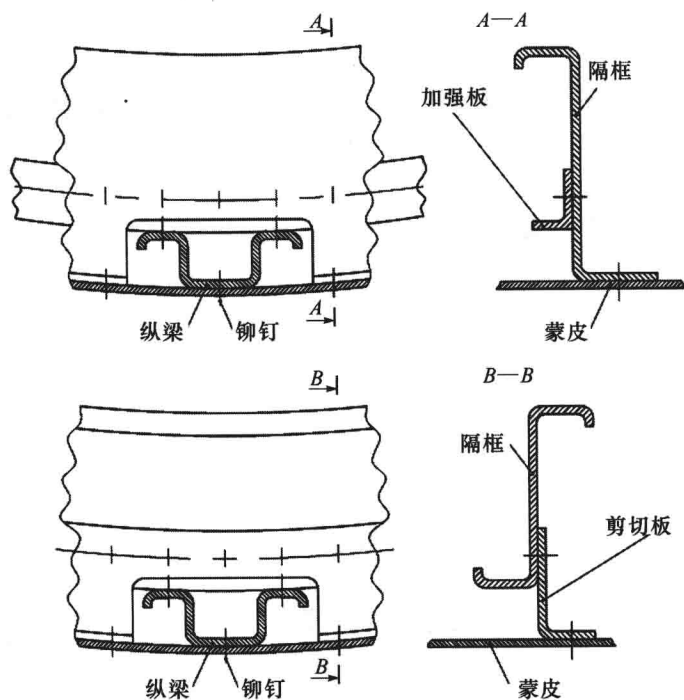


图 1.2 隔框和蒙皮间的剪切带连接(剪切带框架)

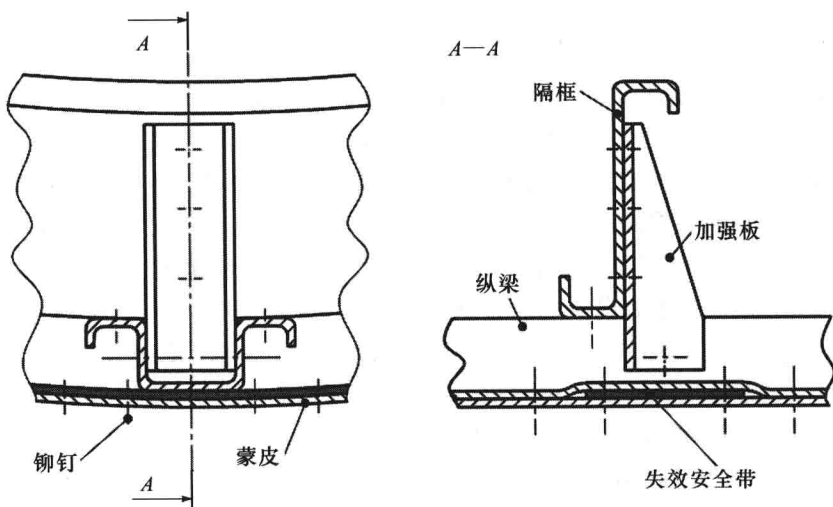


图 1.3 失效安全带中隔框桁条间的桁条扣接(浮动隔框)

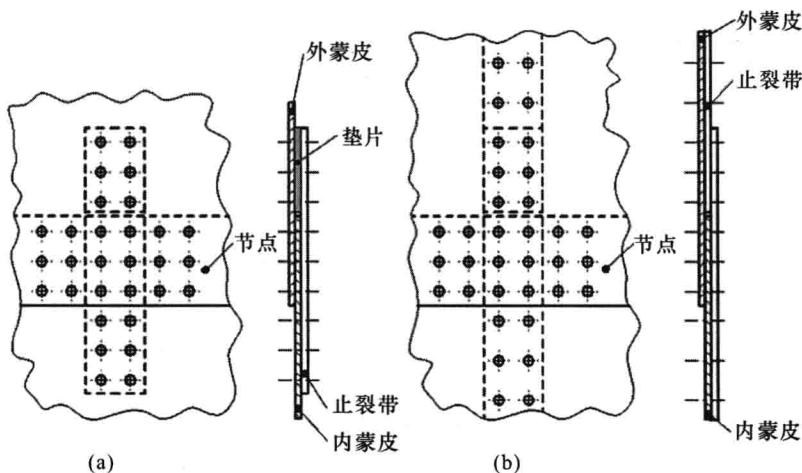


图 1.4 止裂带
(a) 短的; (b) 连续的。

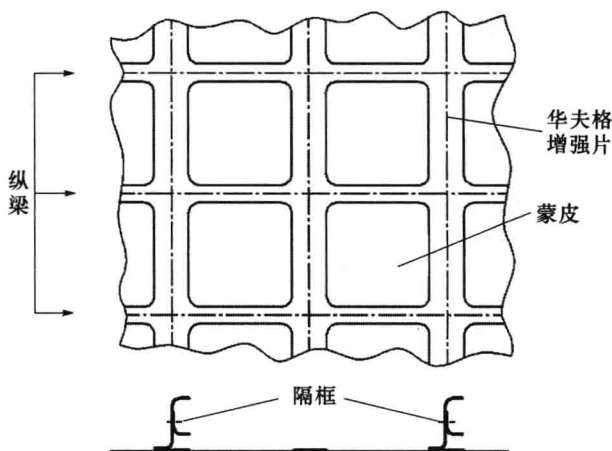


图 1.5 胶接华夫格增强片

1.2 纵向搭接接头的载荷情况

由于舱内增压,在机身蒙皮内会产生薄膜应力,如图 1.1 所示。根据薄壁压力容器理论,蒙皮中的主要载荷是周向张力。对于无增强结构的容器,周向(环向)应力可以用下面的公式计算,即

$$\sigma_h = p \cdot R/t \quad (1.1)$$

式中: p 为内部压力; R 为弧线的半径; t 为壁厚。

考虑到周向和轴向的增强结构,舱横截面的平均周向应力可以用下式计算

(Flugge,1952),即

$$\sigma_h = \frac{t_x p R + \nu(t_\varphi - t)p R / 2}{(1 - \nu^2)t_\varphi t_x + \nu^2 t(t_\varphi + t_x - 1)} \tag{1.2}$$

式中: $t_x = t + A_L / S, t_\varphi = t + A_F / L, A_L$ 和 A_F 分别为桁条和隔框横截面面积, S 和 L 分别为桁条和隔框的间距; ν 为泊松比。

由于纵向应力 $\sigma_1 = 0.5 \sigma_h$,纵向蒙皮接头比横向(周向)接头更关键,所以解决纵向连接的方案是采用互搭接头(lap - splice joint)。通常,蒙皮连接的重叠部分使用不可拆连接件连接,但是也不排除使用胶接或者铆接胶接设计。纵向铆接接头可以是两行、三行甚至四行,如图 1.6 所示。为使机身外表面更加平滑,某些纵向互搭接头被单搭接接头替代,如图 1.7 所示。后一种接头常用在蒙皮的轴向连接。

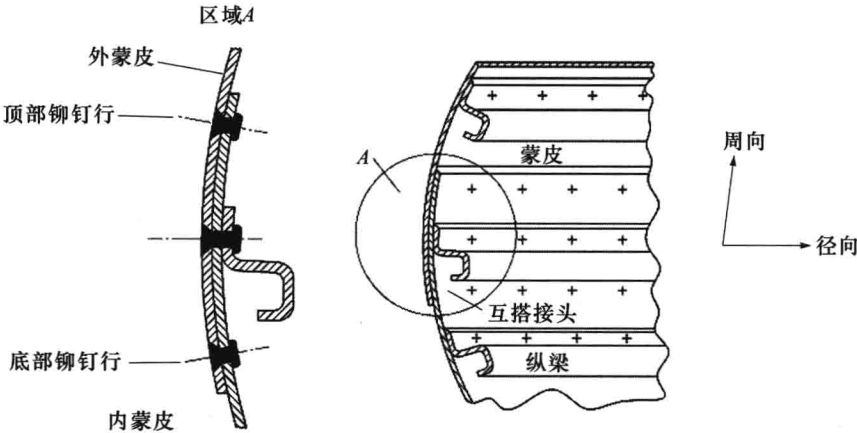


图 1.6 典型机身纵向铆接搭接接头

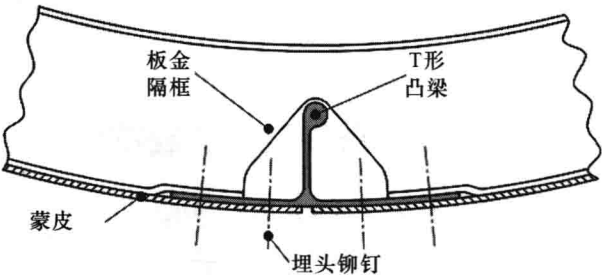


图 1.7 Falcon 7X 上的纵向单搭接接头,达索航空公司(Le Telier 和 Repiton,2007)

对于大多数商业飞机来说,其环境压力是按照海拔 8000 英尺(2438m)的压力来进行设计的。在这个高度上,大气压力约为 0.075 MPa (10.92 psi)。不同高度下,大气压力 p_a 与舱压 $p_c = 0.075 \text{MPa}$ 的压差 Δp 的值标示在图 1.8 中。例

如,某种典型波音宽体飞机机身半径 $R = 3.23\text{m}$ (127 英寸),蒙皮厚度 t 是 1.6mm (0.053 英寸)。在海拔 45000 英尺(13715m)高度时,采用式(1.1)可得名义周向应力为 120MPa (7.4ksi)。Niu (1999)指出,不同类型的飞机,蒙皮内应力 σ_h 在 $80 \sim 110\text{MPa}$ 。

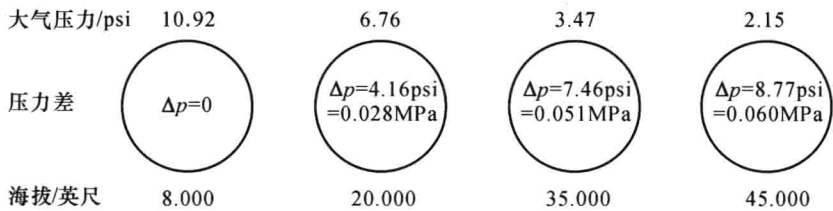


图 1.8 不同高度下的压差 (Niu,1999)

依据搭接接头所在周向位置和沿机身的纵向位置不同,纵向的搭接接头可承受湍流(主要是在低空的爬升和下降阶段)载荷和机动飞行(起飞、着陆)所引起的弯曲和剪切应力,如图 1.9 所示。

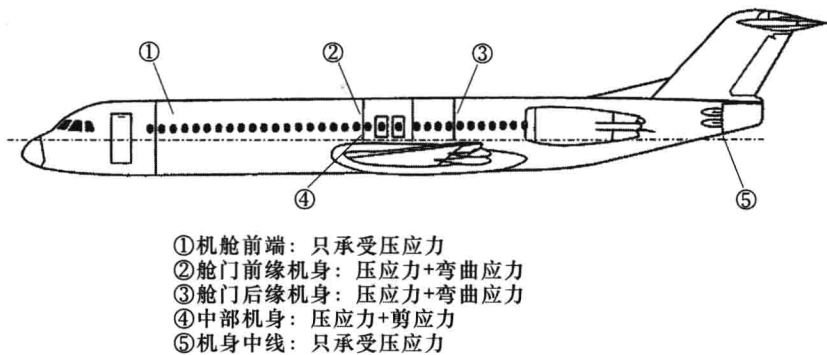


图 1.9 运输机机身载荷情况 (Wanhill,1996)

采用搭接接头和单搭接接头连接都会在搭接处产生偏心距,同时偏心距会导致次弯曲。图 1.10 中的箭头所示位置的最大弯曲应力与外界施加拉应力处于同一个量级(Schijve,2009b)。因此,有偏心距接头的疲劳性能比对称性接头的疲劳性能差。例如,在双搭接接头(double – strap)中不会发生次弯曲。图 1.11对这种情况进行了说明,该图介绍了 Hartman 和 Schijve (1969)所做的恒幅(CA)疲劳试验。图 1.11 表明,对于同样的铆钉孔间距,在经历了 2×10^7 次

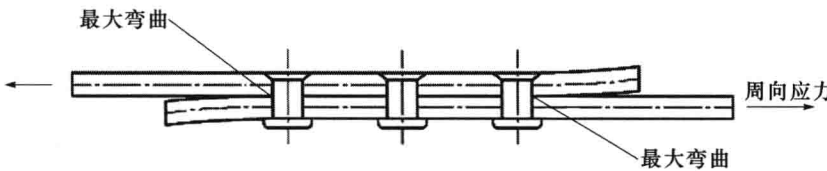


图 1.10 搭接接头中的次弯曲