

# 先进铝锂合金机身壁板结构承载能力研究

## Strength Evaluation of Advanced Aluminum-Lithium Fuselage Panels

张景新 郭沛欣 白杰/中国商飞上海飞机设计研究院

**摘要:** 铝合金是目前飞机蒙皮,长桁和框的首选材料。但第三代铝锂合金在密度、断裂、疲劳、耐腐蚀方面明显优于常规铝合金。因此,铝锂合金正逐步在机身结构中得到应用。本文通过有限元模拟和试验相结合的手段对铝锂合金机身壁板结构的压缩、拉伸和剪切承载能力和变形形式进行了分析。研究结果表明,铝锂合金机身壁板结构和常规铝合金壁板结构的失效模式是一致的。

**Abstract:** Aluminum is currently being used for skins, stringers and frames. But Al-Li is better than aluminum for density, fracture toughness, fatigue, corrosion resistance characteristics. Al-Li is being used for fuselage applications. This paper focus on bearing capacity and form deformation for the compression, tension and shear characters investigation of Al-Li panel by FEA and test method. The results of this study have shown the property of Al-Li panels is similar to conventional aluminum panels.

**关键词:** 铝锂合金; 压缩; 拉伸; 剪切

**Keywords:** Aluminum-Lithium; compression; tension; shear

### 0 引言

飞机机身的主要结构是蒙皮、长桁和框的半硬壳式结构。目前的飞机结

构中,铝合金是飞机蒙皮首选的金属材,长桁和框一般选择高强度的铝合金材料。铝锂合金的发展始自1920年,迄

今为止,已发展到第三代铝锂合金。第一、二代铝锂合金已退出航空工业。由于第三代铝锂合金在断裂、疲劳、耐腐

表2 CCAR25.963(d)建议的符合性方法和验证思路

适航条款	标题	符合性方法	验证思路
CCAR25.963(d)	燃油箱:	MOC1	通过对机身内燃油箱布置、燃油箱周围结构支撑形式等说明,表明对机身内油箱进行了充分防护,以防止擦地的危险
	总则	MOC2	对燃油箱进行可生存应急着陆情况下的惯性力载荷计算及强度计算分析,计算条件需要考虑油箱内的燃油惯性载荷

油箱触地,应使飞机结构的坠撞间隙足够大,可以通过分析和必要的试验来验证符合性。设计人员应通过分析判明破损的形式并详细说明油箱和邻近结构之间以及相邻油箱之间的相互影响。

参考AC25-8、AMC25.963(d),给出关于CCAR25.963(d)建议的符合性方法和验证思路如表2所示:

### 4 结论

本文研究了适航条款CCAR25.

963(d)、14 CFR25.963(d)和CS25.963(d)之间的差异,提出了针对条款25.963(d)建议的符合性方法和验证思路,为运输类飞机的符合性验证提供参考。 **AST**

#### 参考文献

[1] Cominsky, A; Transport Aircraft Accident Dynamics. NASA CR-165850, DOT-FAA-CT-82-70.

[2] CCAR-25-R4 中国民用航空规章 第25部 运输类飞机适航标准[S].

中国民用航空局,2011.

[3] EASA Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes [S]. EASA, 2011.

[4] FAR-25 Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes [S].FAA, 2012.

[5] Notice No.25-137 Harmonization of Airworthiness Standards—Miscellaneous Structures Requirements [Z]. FAA, 2013.

[6] AC25-8 Auxiliary fuel system Installations [Z]. FAA. 1986.

#### 作者简介

毛文懿,硕士,工程师,从事动力装置和燃油系统适航工作。

蚀方面明显优于普通铝合金,因此,铝锂合金正逐步在民用客机结构上得到应用,如空客公司新机型A380部分结构件采用了铝锂合金,以达到减重、提高耐久性目的。

## 1 试验件简介

试验件分为壁板压缩试验件、壁板拉伸试验件、壁板剪切试验件三类,各类试验件结构参数和材料见表1。试验件见图1。

## 2 壁板压缩能力

### 2.1 有限元分析

为了能够比较准确地模拟结构压缩作用下结构的破坏过程,在计算时直接采用了有限元软件Abaqus进行分析。利用Abaqus导入Catia三维模型得到计算模型,导入后的计算模型见图2。

计算采用显示动力学非线性计算模式。在壁板轴向的弯心位置加上一个位移边界条件,然后将弯心与夹具的加载面利用COUPLE连接方式连接在一起。同时,固定端位移限制为0。模型中所有的接触均用TIE接触定义。由于压缩试验在侧边蒙皮处有刀口,因此,蒙

皮侧边按照实际刀口的加载位置约束离面位移。

计算出的壁板的总体位移图和Mises应力图如图3所示。

通过有限元数值计算壁板压缩破坏位置在壁板中段靠近边缘的两根长桁与蒙皮连接处附近。破坏形式应为长桁明显侧弯,壁板失稳。

### 2.2 试验方法

铝锂合金机身壁板压缩能力是通过壁板压缩试验,试件两侧边采用“刀口”支持,模拟简支边界条件,通过端头施加压力达到压缩试验目的。图4为压缩试验的试验台照片,试验台主要由液压机、刀口和侧向支撑块组成。

### 2.3 试验结果

在压缩过程中,由于桁条和蒙皮的刚度不同,所以在受到压缩后,蒙皮和桁条都会出现失稳现象,但是会由于不同的边界条件而不同。试验中机身壁板在加载过程中,出现了壁板失稳现象,主要表现在:

1) 在位移较小的情况下发生平面内的弹性变形,位移载荷曲线呈线性;

2) 在一定载荷的作用下发生屈曲变形;

3) 在载荷较大的情况下,蒙皮与长桁部分发生分离;

4) 在载荷较大的情况下,铆钉突然断裂,长桁与蒙皮发生分离,进而使得长桁和蒙皮发生明显弯曲。

试验件压缩破坏见图5,有限元分析和试验结果比较见图6。从图6中可以看出破坏形式一致。

## 3 壁板拉伸能力

### 3.1 有限元分析

为了能够比较准确地模拟结构拉伸作用下结构的破坏过程,在计算时直接采用了有限元软件进行分析。采用的有限元分析软件为Abaqus。利用Abaqus导入Catia三维模型得到计算模型,导入后的计算模型如图7。

计算采用隐式静力学非线性计算模式。在壁板轴向的弯心位置加上一个位移边界条件,然后将弯心与夹具的加载面利用COUPLE连接方式连接在一起。同时,固定端位移限制为0。模型中所有的接触均用TIE接触定义。

计算出来的挤压长桁的轴向位移图和最大主应力图如图8。

通过有限元数值计算壁板拉伸破坏位置在长桁中段以及蒙皮中段。

### 3.2 试验方法

表1 试验件结构参数表

试验件类型	长桁2196-T83		框2024-T42		蒙皮2198-T8	
	根数	间距(mm)	数量	间距(mm)	基本厚度(mm)	化铣区厚度(mm)
压缩	3	150	2	530	1.8	1.4
拉伸	3	160	/	/	1.8	1.4
剪切	6	150	3	530	1.8	1.4

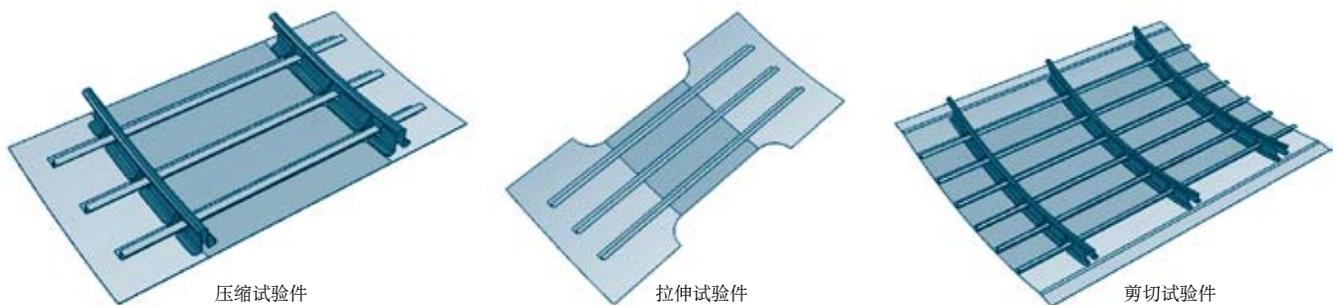


图1 试验件简图

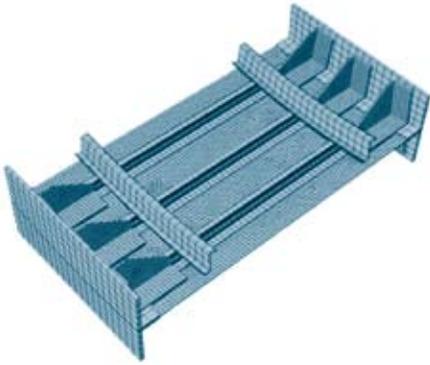


图2 壁板压缩试验网格划分

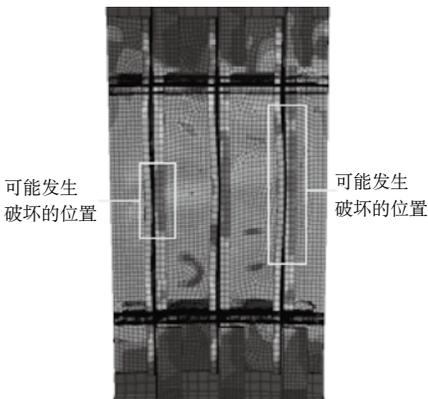


图3 壁板压缩数值计算Mises应力分布

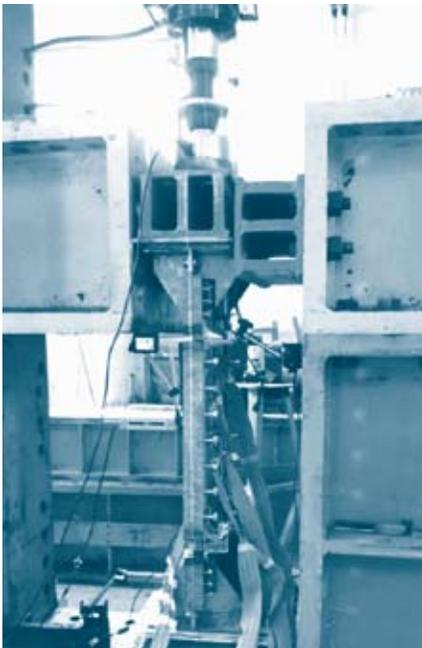


图4 压缩试验的试验台

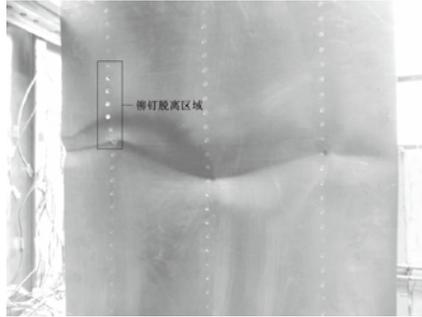


图5 壁板压缩试验破坏示意图



图6 壁板压缩比较图

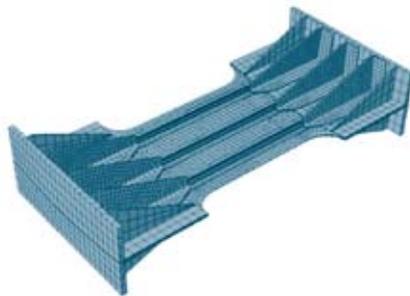


图7 壁板拉伸网格划分

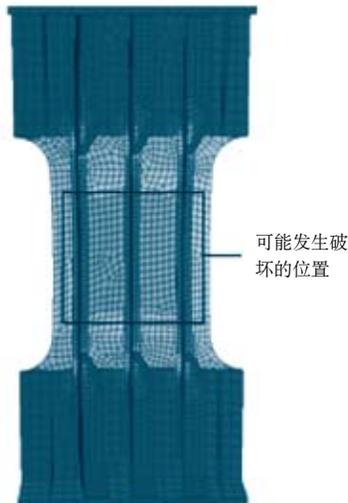


图8 壁板拉伸试验数值计算最大主应力

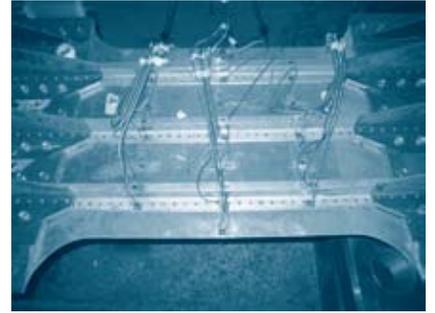


图9 壁板拉伸试验台

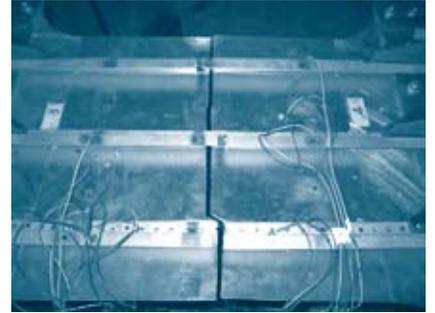


图10 壁板拉伸试验断裂图

壁板拉伸承载能力试验是典型的结构承载能力试验。试验选择采用作动器加载。整体的加载方案主要采用的是利用液压机轴向拉伸产生轴向拉伸载荷形式。试验台主要由液压机、作动器、连接件和支撑框架组成。拉伸试验的试验台照片如图9所示。

### 3.3 试验结果

在拉伸试验进行的过程中,有以下现象:

1) 在位移较小的情况下蒙皮与长桁发生弹性形变,载荷与位移呈明显的线性关系;

2) 在破坏载荷作用下长桁和蒙皮分离,铆钉发生破坏,试件从中间断裂。

试验件拉伸破坏见图10,有限元分析和试验结果比较见图11。从图11中可以看出两者破坏形式一致。

## 4 壁板剪切能力

### 4.1 有限元分析

壁板剪切有限元模型单元主要采

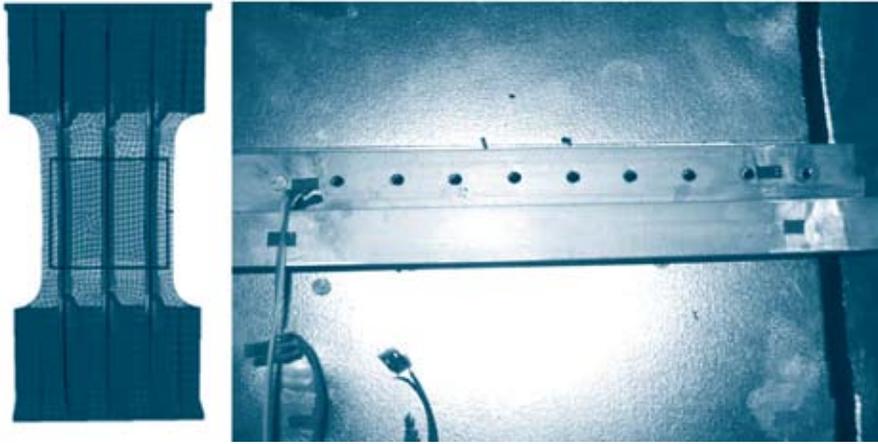


图11 壁板拉伸比较图

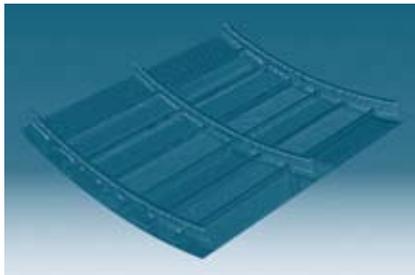


图12 壁板剪切分析模型

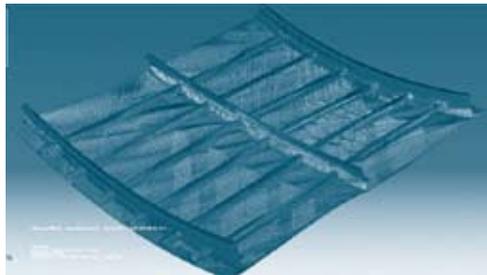


图13 壁板剪切失稳分析结果

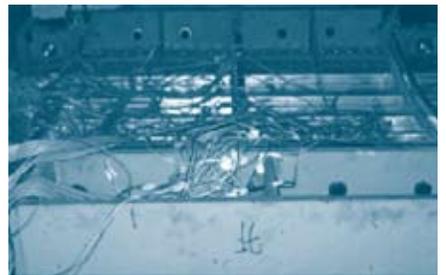


图14 壁板剪切试验台



图15 壁板剪切失稳破坏

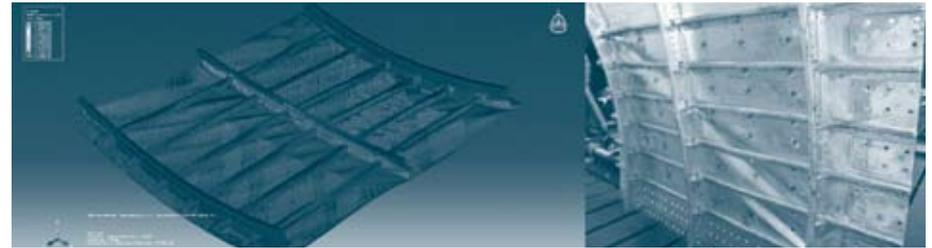


图16 壁板剪切比较图

用4节点四边形单元,在计算过程中没有考虑长桁与蒙皮、框与蒙皮之间的铆接形式,直接采用了固连的形式进行分析,见图12。

计算出来的挤压长桁的轴向位移图和最大主应力图如图13所示。

#### 4.2 试验方法

将壁板试件固定在一个方框形夹具内,方框形夹具的各边之间采用类似球铰的连接。夹具的一条边完全固定、其对边悬挂在一个吊臂上,吊臂的回转半径与试件的曲率半径相同。用作动器

驱动吊臂垂直于长桁运动,吊臂就会带动试件绕固定点旋转,则试件可以受到纯剪切载荷的作用。剪切试验的试验台照片如图14所示。

#### 4.3 试验结果

通常壁板的剪切试验是决定壁板的主要承载能力的试验之一。在剪切试验过程中,有以下现象:

- 1) 在位移较小的情况下蒙皮与长桁发生弹性变形,载荷与位移呈线性关系;
- 2) 在载荷达到一定值时,蒙皮沿

45°屈曲;

3) 在破坏载荷作用下长桁和蒙皮分离,铆钉发生破坏。

试验件剪切失稳破坏见图15,有限元分析和试验结果比较见图16。从图16中可以看出两者破坏形式一致。

## 5 结束语

本文主要对铝锂合金机身结构壁板结构的压缩、拉伸和剪切能力通过有限元模拟和试验相结合的手段对铝锂

合金机身壁板结构的承载能力和变形形式进行了分析。从分析和试验结果上表明,理论分析能够较好地预测结构的失效和失效形式;铝锂合金机身壁板结构和常规铝合金壁板结构的失效模式是一致的。

AST

#### 参考文献(略)

#### 作者简介

张景新,硕士,研究员,主要从事飞机机身结构设计。