

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2018.02.008

# 飞机机身壁板上小开口的设计方法探讨

## Design of the Small-Size Cutout Structure on the Panel of Aircraft's Fuselage

柳 醉 / LIU Zui

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

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

### 摘 要:

民用飞机的设计技术已经越来越重要。飞机结构工程师会根据飞机结构及功能的需要在飞机机身壁板上设计很多小开口结构,这种小开口结构设计的质量对飞机力学性能和重量等方面都有直接的影响,所以小开口结构的设计已成为飞机设计过程中的重要组成部分,一个成功的机型必须要有优秀的小开口设计。结合某型飞机的结构设计过程,详细分析和探讨了机身小开口结构的设计过程,具体包括载荷分析、相关零部件设计、密封及表面防护设计等方面的内容。

**关键词:**小开口结构;飞机;壁板;机身

**中图分类号:**V223

**文献标识码:**A

[**Abstract**] The design technology for civil aircraft has already become more and more important. Because of the need for aircraft's structure and function, the aircraft structure engineers can design many small-size cutout structures on the skin panel of aircraft's fuselage. The quality of such small-size cutout structures can directly affect physical mechanical performance and weight for the airplane, etc. The design of small-size cutout structure is an important part of the aircraft's design process, and a successful aircraft must have an excellent design of the small-size cutout structure. Based on a certain type of aircraft, the design procedure of the fuselage small-size cutout structure has been analyzed and discussed detailedly in this article. Load analysis, design of relevant components, seals and surface protection, etc are also studied concretely in this paper.

[**Keywords**] small-size cutout structure; aircraft; skin panel; fuselage

## 0 引言

为实现飞机的某些功能或属性(例如门、窗、维护、检修、通过液压管路、通过电气线束、系统排气等),飞机机身壁板上经常需要设计一些开口结构,优秀的开口设计可在某种程度上体现出飞机的先进性。按直径的相对大小可将开口大致分为大开口、中等开口和小开口。一般来说,登机门、服务门、货舱门、起落架舱门、辅助动力装置(Auxiliary Power Unit, 简称APU)舱门等属于大开口;维护口盖、窗框、推力回收活门(Thrust Recovery Valve, 简称TRV)口、高低压充气口等属于中等开口;其它诸如通气口、排气口、天线开口、线束开口、液压/燃油

管路开口等可定义为小开口。由于开口区存在应力集中,而且开口区的静力和疲劳设计也往往缺乏足够的数据库,故开口区的结构设计与分析通常较非开口区显得困难。本文仅讨论和分析小开口的设计方法。

## 1 机身壁板上的小开口结构形式

小开口,顾名思义,就是尺寸相对较小的开口。小开口可以位于机身的各个部位,以侧下部和下部居多;其开口形状可按需而定,一般以圆形、椭圆形、方形为主,其它不规则的形状由于应力集中过于严重而较少使用,少数特殊部位如需使用也应采取附加措施以减轻不利影响;图1所示为飞机机身

壁板上典型的小开口形状。

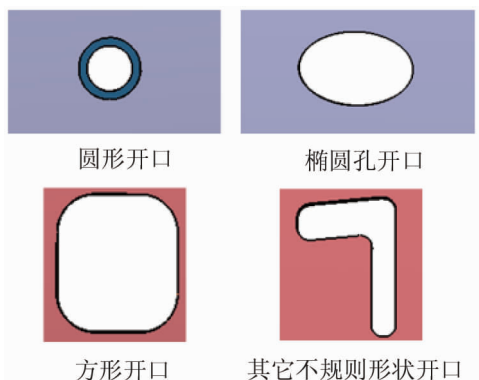


图1 飞机机身壁板上典型的小开口

壁板上的小开口有时会增加结构的重量,因为小开口的存在会破坏载荷传递的路径,使原有的结构效率降低,有时需要适当增加开口附近结构的强度来承受原开口处应承受的载荷以及由于载荷重新分布而产生的一些力。一般来说,壁板上的小开口应按照其对结构的影响程度来决定是否采取补强措施及采取何种补强措施;由于小开口尺寸相对较小,故其对结构完整性的影响也是局部性的;对位于低载荷区的小开口,如开口后结构的强度裕度能满足设计要求,则可以考虑不设计额外的补强结构以节省机体重量;对位于中、高载荷区的小开口,开口周围需要设计额外的补强结构来承受和传递载荷。小开口的补强方法有很多,一般采用简单且有高结构效率的设计方案,例如加强板、凸缘、口框等;图2所示为飞机机身壁板上小开口的典型补强方案。

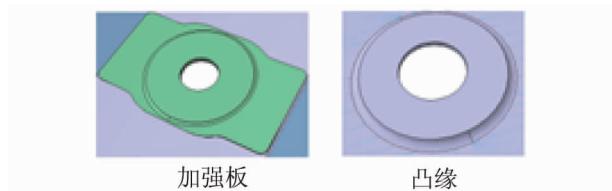


图2 飞机机身壁板上小开口的典型补强方案

## 2 小开口结构的载荷分析与补强设计

### 2.1 开口后的载荷分析

一般来说,机身壁板上的小开口结构必须要在蒙皮上开口,有时还因特殊情况要断开长桁;显然,机身壁板传力结构的连续性将在开口处中断,而且开口尺寸的大小和断开长桁的根数对补强结构的

设计有着直接影响。目前国内外现役民用飞机的相关设计经验表明,为了弥补开口对机身壁板传力连续性的破坏,一般可以采用两种方式:一种是在蒙皮开口的周围布置口框等构件,利用口框等构件的抗弯曲性能将载荷传走;另一种是对薄壁结构(机身蒙皮)进行强化(采用加强板、凸缘等),使开口区的结构仍然能有效地参与受力和传载。具体设计时可根据实际情况综合采用上述两种方法。

本文所讨论的小开口结构位于机身壁板上,属于半硬壳式结构开口,其对飞机的总体受力影响有限,一般在开口周围进行局部加强即可减轻甚至抵消开口对受力和传载造成的不利影响。

开口位于蒙皮上时,通常会对蒙皮剪流产生一定的影响。由《飞机设计手册》第10册,结构设计第242页的分析可知,机身蒙皮上开口、后开口周围的应力分布会发生变化,开口的上下左右均得到大于原始剪流值,而开口的四角区域内均得到小于原始剪流值。

### 2.2 典型的补强设计

现代民用飞机一般都采用薄蒙皮结构,由2.1节可知蒙皮上的开口将对蒙皮内的剪流分布产生影响,为了弥补开口对飞机结构强度及刚度性能造成的不利影响,结构工程师通常会在开口周围设计加强板来紧贴蒙皮开口表面。

以机身蒙皮上的小尺寸圆形开口为例,探讨小开口的影响及其通用的加强原则。此处的小开口设定为位于半硬壳式机身的两根纵向桁条之间,直径不大于桁距的40%,如图3所示。圆形开口的应力集中系数相对较小,且此处开口的尺寸也相对较小,故其对机身蒙皮剪流的影响也小,只有非常接近开口的部分才会稍微受到载荷重新分布的影响。

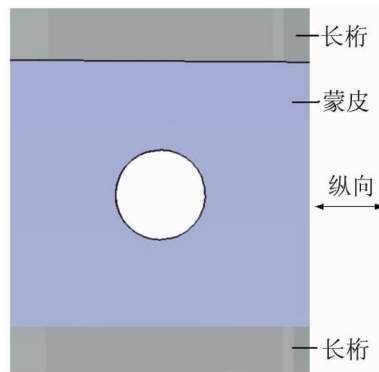


图3 蒙皮上的小圆口示意图

按经验,此处一般会使用环形加强板来补强,且加强板的设计需遵行以下原则:(1)加强板的厚度比蒙皮的厚度大 1~2 级为宜(每级的厚度可定为 0.2 mm),其材料一般与蒙皮相同即可,在特别关键的区域也可选用性能更好的材料;(2)加强板的面积不小于开口面积的 1.5 倍;(3)固定加强板的紧固件必须能承受开口周围的剪切载荷。以上几条原则在设计开口加强板的时候经常用到,图 4 为加强板的设计示意图。

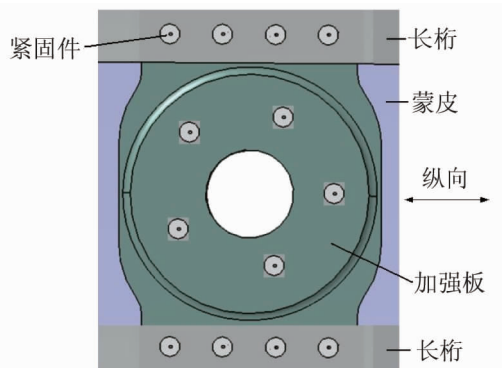


图 4 蒙皮上的环形加强板设计示意图

另外,为提高蒙皮补强区的稳定性及传载效率,加强板的周边最好能分别伸到开口边桁条和边框下部并与其共铆;在高载荷区,尤其是机体的疲劳关键区,为降低应力集中、改善开口区在增压舱载荷下的疲劳性能,并保证机身壁板的轴向载荷和蒙皮的剪切载荷能在开口补强区平稳地传递,加强板的两边(轴向载荷方向上)甚至四边可设计成波浪形边缘;另外,为避免造成蒙皮的刚度突变,进而产生局部硬点破坏,在开口附近的长桁端头的立边最好能进行斜削设计,斜削角(定义为斜剖面与长桁轴线的夹角)以  $30^\circ$  左右较为合适,如图 5 所示。凸缘的设计思路与加强板相同,一般由材料整体加工而成。

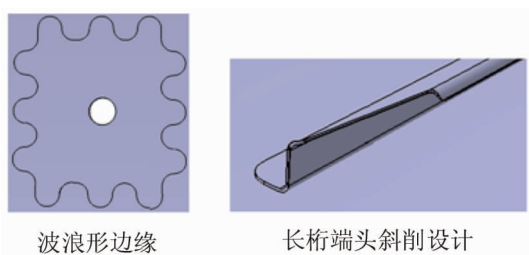


图 5 壁板上小开口处的薄壁强化设计

### 3 机身小开口结构的设计要求

按照经验,机身壁板上的小开口数量众多,每一处开口都会对结构的完整性造成一定的影响,这种影响主要体现在强度方面,结构工程师应尽量将开口布置在载荷较低的位置,以简化补强结构的设计、提升机体的效率。

飞机设计中,一般认为腐蚀和疲劳具有同等的破坏力,且很多疲劳破坏都是由腐蚀引起的,所以飞机结构的防腐蚀设计很重要;对于机身壁板上的小开口来说,防腐蚀设计是结构工程师必须要考虑的,尤其是在机身下侧污染物比较容易聚集的部位,现在的民用飞机下半部一般采用底漆加面漆的表面处理方法以对抗环境腐蚀,在环境更恶劣的区域(例如厨房和盥洗室下部)还增加使用防腐蚀抑制剂。

对于气密增压区的小开口来说,气密性设计是很重要的;为保证气密性,气密堵件、加强垫板等结构件和蒙皮之间除了贴面密封之外,一般还需要在零件的边缘进行填角密封。

### 4 结论

本文详细分析和探讨了飞机机身壁板上小开口的设计,从中可发现,优秀的开口设计对飞机的重量控制、疲劳寿命等方面均有非常积极的作用,其设计过程需要综合考虑开口区域载荷分布、强度、刚度、位置布置、防腐蚀、气密性等设计因素。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 牛春匀. 实用飞机复合材料结构与制造[M]. 北京:航空工业出版社,2010.
- [4] 牛春匀. 实用飞机结构工程设计[M]. 北京:航空工业出版社,2008.
- [5] 沈真. 复合材料结构设计手册[M]. 北京:航空工业出版社,2011.

#### 作者简介

柳 醉 男,本科,工程师。主要研究方向:飞机结构设计;  
E-mail: liuzui@comac.cc