

从飞机结构的腐蚀、静强度、疲劳、刚度等几个方面,简要介绍了飞机结构常规修理方法及其可行性、可靠性分析。

飞机结构常规修理方法及分析

The Aircraft Structure General Repair and Analysis

◎ 刘琦 / 东航山东分公司飞机维修部

飞机结构的损伤主要分为飞机结构腐蚀、静强度破坏、疲劳裂纹/断裂、意外损伤等。根据飞机结构维修的有关理论、损伤部位和损伤情况、航材供应情况、飞机可停场时间、维修成本、本单位飞机维修能力等因素,参照该型飞机的相关修理手册,在不影响飞机安全和正常使用的前提下,合理地制定飞机结构修理方案并进行可靠性分析十分重要。

腐蚀的常规修理及分析

飞机金属结构件的腐蚀多数属于电化学腐蚀。飞机在出厂时采取了一定的防腐措施,但由于飞行环境、飞机的使用和维护保养情况不同,因此在结构修理过程中,除了要恢复原厂家设计的防腐能力外,必要时还应比厂家提高一步。常用的防腐措施有以下几种。

(1) 全面检查易腐蚀件周边环境,找出产生腐蚀的条件及诱因;及时发现腐蚀的原始痕迹,彻底清除腐蚀产物,恢复防腐涂层,进行相应的结构修理。

(2) 定期清洁飞机容易污染的区域,特别是容易受液压油、强腐蚀介质、电解质污染的区域或结构件,重新喷涂防腐抑制剂。

(3) 定期或经常性地疏通漏排水孔,保证漏排水系统一直处于畅通的工作状态。

(4) 确保厨房、厕所及货舱地板接缝处的密封,防止水及污染物渗入结构表面,若发现防腐涂层破损,立即修复。

(5) 因修理而加工过的铝合金表面,彻底去除腐蚀层,加工表面要光滑,并保证修理区域的清洁,不允许金属屑(特别是铁屑、钢屑)、油污等污染物滞留在修理区域内;根据相关的维修手册要求,恢复其原有的表面涂层,必要时再增加一层面漆,喷涂防腐抑制剂。

(6) 安装修理件、安装钢和钛合金零件的配合表面及必要时的紧固件,应涂密封胶进行湿安装,所有止裂孔要涂底漆并用软铆钉或密封胶堵住。

(7) 钢修理件一般应局部镀镉或恢复原涂层;如果条件不具备,也可以涂两道底漆。

(8) 地板与金属结构的接触表面,可粘贴聚乙烯胶带绝缘。

(9) 深入研究腐蚀的起因,制定相应的预防措施并不断完善和提高。

静强度破坏的常规修理及分析
损伤构件经修理后的静强度要等

于或略大于原构件要求。例如,使用加强板或搭接带进行构件的加强修理时,一般要比损伤件加厚一个等级,并使用一定数量的紧固件以传递加强板的全部载荷。一般用原牌号的紧固件更换损伤的紧固件;如果没有原牌号的紧固件,可以用强度相同或加大一级的经批准的紧固件替代。

1. 典型的连接失效

大部分的飞机结构件是靠紧固件连接的,大部分的飞机载荷也是通过紧固件来传递的,因此,飞机结构件的损伤和修理也离不开紧固件。

(1) 紧固件受剪力被切断;

(2) 紧固件受拉力被拉断;

(3) 相邻结构材料受挤压而产生塑性变形,即材料屈服;

(4) 相邻结构件的剪切失效,相邻结构件因受剪应力过大而造成撕裂、剪断;

(5) 相邻结构件的拉伸失效,紧固件附近的结构件因拉应力过大而造成材料的拉断现象。

2. 裂纹修理所需紧固件的数量和分布

裂纹每侧所需铆钉数量

$$N=T*L*U*1.15/R$$

式中 T = 裂纹结构件的厚度(英寸);

L = 裂纹长度(英寸);

U = 裂纹结构件抗拉伸极限强度 (PSI) ;

R = 修理中使用铆钉的剪切许用强度 (磅) ;

1.15 = 安全裕度。

3. 传力分析

在进行结构修理时,一般应了解飞机结构所承受的载荷大小、方向、分配方式以及载荷的传递路线。在进行飞机结构的传力分析以后,就可以分清主次结构,了解构件的受力形式及大小。

4. 等强度修理

由于修理的目的是使被破坏的结构恢复原来的强度,所以可以通过连接件的强度或被破坏构件的强度来推算出原来的结构件设计载荷。一般飞机设计的最小安全裕度是 1.1,因此推算出的结构件载荷除以 1.1 即可作为该结构件的最大载荷值。

一般根据紧固件的许用强度值,可推算出临近结构的载荷,根据材料的许用强度值及横截面积,可推算出临近结构的载荷。

疲劳损伤的常规修理及分析

由于疲劳损伤其不确定性和不易检查等特性,给飞机的安全造成极大的威胁。全世界航空史上多次空难都是由于飞机结构件的疲劳损伤直接造成的。防止结构件出现过早的疲劳破坏,使修理件和相关区域的抗疲劳水平不降低,保证飞机达到或接近规定的使用寿命,是飞机结构修理中遇到的难题之一,也是衡量飞机结构修理水平的重要标志之一。飞机的设计标准、载荷、结构形式已确定,如何在结构修理中保持其原有的抗疲劳设计水平不变,是飞机结构修理工程技术人员须探讨的课题。

1. 合理选材

在飞机结构修理过程中,当需要加强或更换损伤的结构件时,新的替换件或加强件一般应与原结构件材料相同,刚度相匹配。如果因为航材原因,需要不同材料的替换件或加强件时,应保证新构件与原构件刚度相同或相匹配,新构件的抗疲劳性能不得低于原构件。

2. 合理控制修理区域的应力水平

修理件的强度与原构件相匹配或略高于原构件,正确布置修理件的纤维方向,主要载荷方向平行于修理件的纤维方向,提高材料的有效利用率。

3. 紧固件载荷的合理分配

每个紧固件上分配的载荷是不均匀的,特别是在极限载荷作用下,材料将产生塑性变形,由于部分紧固件承担的载荷增大,致使载荷的分布更趋不均匀。在材料的弹性范围内,通常是两端紧固件分配的载荷大,中间位置的紧固件分配的载荷小。载荷的分配取决于紧固件的排列方式、材料的刚度(硬度),载荷是按照刚度分配的。为使载荷平均分配到每个紧固件上,一般连接构件采用阶梯状或变厚度方式,紧固件选用平行排列方式。合理排列紧固件、合理选择连接构件的厚度,就可以平均分配紧固件上的载荷,降低构件和紧固件的应力水平,增加结构的抗疲劳强度。

4. 尽量避免或降低应力集中

应力集中对疲劳强度的影响由“应力集中系数 K_t ”和“疲劳降低系数 K_f ”决定。 K_f 有时也称为“有效疲劳应力集中系数”, $K_f =$ 光滑试件的疲劳强度 / 缺口试件的疲劳强度。 $K_t =$ 最大局部弹性应力 / 平均应力。

理论研究和实践均表明,塑性材料 $K_f < K_t$, 应力集中对疲劳寿命的影响小;

刚度大的材料 K_f 比较接近 K_t , 应力集中对疲劳寿命的影响较大。为了减小应力集中对疲劳寿命的影响,应该注意以下问题。

(1) 选择塑性较大的材料做加强件,通过变形协调的方式,可有效地克服和降低应力集中对疲劳寿命的不利影响。

(2) 结构件上高应力区域尽量少开口或不开口,避免在此区域打钢印,剪应力板上尽量不开口,如果必须开口,其位置尽可能选在低应力区域。宽板小圆孔的 $K_t = 3$, 大尺寸剪力板 $K_t = 4$, 可见开孔对结构件的不利影响很大。如果需要开口,应尽量开较大的椭圆孔,其长轴方向尽量平行于主要载荷方向。若垂直于载荷方向的椭圆孔轴长度为 a , 平行于载荷方向的椭圆孔轴长度为 b , 则:

$$K_t = 1 + 2a/b$$

可见 a/b 值越小 K_t 越小;反之 a/b 越大 K_t 越大。由此可得出,平行于载荷方向的裂纹不产生应力集中;长轴平行于载荷方向的椭圆孔,且长轴与短轴长度相差越大,应力集中越小。垂直于载荷方向的裂纹,应力集中系数趋于无限大,材料很快就会被破坏掉,这就是通常所说的“劈”现象。

(3) 结构件尽量避免横截面的突变,在横截面尺寸或形状改变的地方,尽可能采用大圆角过渡,以减小应力集中。

(4) 结构件上的空孔(除减轻孔以外)用紧配合的紧固件堵孔,可减小应力集中。

(5) 机械加工及热处理的零件,应该进行人工时效或自然时效,以消除不良残余应力引起的应力集中。

(6) 重要受力件应具有较高的表面硬度,可以通过表面喷丸处理、冷作

硬化、高频淬火等方法提高材料的表面硬度及耐磨性能,重要紧固件孔可通过冷挤压工艺提高孔壁的表面硬度,但应严格控制工艺参数和工艺过程,避免产生有害的残余应力。

(7)重要受力件表面粗糙度值一般不高于 $3.2\mu\text{m}$;避免划伤、冲坑、工具印痕等人为缺陷,消除因应力集中而产生的疲劳源。

(8)受力结构件的加工边缘应保证足够的圆角,一般为 $R0.020/R0.030$ 。钛合金对缺口敏感性很大,因此,不允许出现尖锐的缺口或凹坑。

(9)防止构件的应力腐蚀及钢的氢脆脆变现象。

(10)构件配合部位的公差要合适,避免装配时产生残余应力,应规定残余应力的消除方法。

(11)使用指形板扩散应力集中,降低修理区域的应力水平,提高疲劳寿命。

5. 尺寸效应对疲劳寿命的影响

构件的疲劳寿命随其尺寸的增大而降低。大尺寸构件的高应力区域大,隐含了更多容易产生裂纹的缺陷,产生裂纹的概率较大,因此尽量采用小尺寸加强构件。

6. 构件对称布置

在修理中应尽量不采用单侧加强方案,避免附加弯矩及偏心载荷对结构的加载而造成修理件提前失效。

7. 孔的公差要合适

当采用螺栓连接时,避免松紧配合在同一处混合使用,避免在受剪螺栓附近布置受拉螺栓。在主要受力件的应力集中区域,不能装置其他辅助构件。

8. 对重要螺栓要求

重要的螺栓应采用滚制螺纹,重要的承拉螺栓要按手册要求施加拧紧力矩;受交变载荷的螺栓,一般应施加预

紧力,其大小是螺栓拉伸强度的 $5\%\sim 20\%$ 。

9. 在特殊环境下的防护措施

如在高温、摩擦、腐蚀、振动、声振条件下工作的构件,要采取特殊的防护措施。例如,发动机尾喷口热场内工作的构件,需要有足够的柔度和变形补偿,以免发生裂纹。

10. 玻璃构件

必须与骨架协调,间隙要均匀适当,并有防振措施,避免因翘曲而使构件出现裂纹。

11. 传力线

结构中应避免传力路线中断,使加强件上的载荷均匀扩散到临近的主传力构件上,修理件和传力路线应尽可能简单和直接。

12. 铆钉孔、螺栓孔、焊缝

这些都是产生应力集中的地方,在连接处适当增加材料厚度以减少局部应力;采用过盈配合的紧固件或冷挤压孔,可增加孔壁的硬度和抗疲劳寿命;对焊缝进行磨削,使其平滑也可减小应力集中。

13. 表面防护

采取必要的表面防护措施,防止表面发生缺陷,但要不能影响疲劳性能。

刚度补强及分析

飞机结构的刚度不够,飞行中就不能保持良好的空气动力学性能,而且会产生颤振或共振,直致破坏结构;如果修理件刚度过大,就会造成修理件承力加大,增加临近结构件的载荷,使相邻结构件因过载而提前失效。

1. 修理件刚度要求

修理后零件的刚度尽可能与原结构件相近,既不能使局部刚度过小而产生塑性变形,也不能局部刚度过大(形成局部硬点)而造成周围结构件因分

配的载荷过大而提前破坏。

2. 刚度和变形协调的原则

(1)避免在刚度较大的主传力路线附近平行地布置较柔弱的传力构件。

(2)长桁搭接而蒙皮连续的地方,避免蒙皮可能因长桁搭接头刚度过大而超载,出现蒙皮失稳现象。

(3)在结构修理中,应避免同一连接接头上或同一传力路线上,混合使用不同规格及材料的紧固件,这样容易使较弱的紧固件因超载而提前失效。

(4)在对主承力构件,如梁、长桁、隔框、肋等的修理中,应避免修理件局部刚度过大而使周围结构超载。

(5)避免过分加强损伤构件造成因变形不协调而导致周围结构件超载。

在飞机修理中应满足的几项要求

1. 空气动力

现代飞机为了提高飞行安全和经济效益,大幅度地提高了飞行速度,并适应短跑道机场起降;飞机制造商利用了最新的飞机设计、制造工艺和空气动力学理论,制造出高水平的光滑流线型飞机表面,因此,在飞机结构修理中,特别应注意保持和恢复原有飞机的流线形和蒙皮外表面的光洁度。任何蒙皮表面的凹陷、凸起或粗糙缺陷,都会降低飞机的飞行性能,增加油耗。

2. 密封性

通过相应的密封胶涂层材料,隔绝空气、水、化学制剂、电解质等侵入结构表面或缝隙中,以达到密封和防腐作用。

3. 降低结构修理的重量

在修理件满足强度、刚度和疲劳性能的基础上,尽量把修理所增加的重量降到最低限度。对于某些重量敏感区域或需要重量配平的的结构件修理,修理

介绍了用真空袋维修技术代替原制造商的维修技术进行金属蜂窝结构修理时,要进行的工艺和结构分析、破坏性试验以及无损检验。

民用飞机铝蜂窝结构的胶结修理

Aluminium Metalbond Repair of Commercial Aircraft Structure s

◎石林

现代民机的维修由于采用原生产工艺的成本高,航空公司在维修时不能按原有工艺进行修理而采用替代方案。但是,在采用替代方案时,有必要对新的修理技术进行详细的优化分析并进行验证和试验,以确保修理技术能恢复原设计的要求。

本文以铝金属蜂窝结构的胶结修理为例,介绍航空公司或维修商应如何进行修理技术的可行性分析。

在现代许多大型民机上装有许多

胶结的铝蜂窝结构件,用作承力或非承力结构。由于这些铝蜂窝结构件的修理工时及工装费用高昂,航空公司及维修公司常常不愿进行某些维修程序,从而使零件修理的经常性成本及更换成本很高。例如,民机的后缘襟翼,这是一种铝蜂窝胶结装配件。

这种结构经常是要用磷酸阳极化槽进行表面处理,用 172~689 kPa 压力在热压罐中增压固化并经过 C 扫描无损检验。如仍用结构原设备制造

商的制造工艺进行修理,则按其结构维修手册进行维修技术分析。但是,航空公司一般多采用可替代的方法,其原因如下。

- 热压罐固化的胶结及装配用工装成本高;
- 广泛的分解及再装配也需要另外合格的人力;
- 分解与再装配常会另外引起构件损伤;
- 原制造商用的材料及设备难购

后重量应与原结构重量保持一致。

4.可接近性

在进行结构修理时,必须考虑施工的可行性、可接近性。一般需要施工路线、步骤、施工空间并尽可能易于操作,必要时开施工口。

5.可检查性

在满足以上条件的基础上,还应重视修理件的可检性,尤其是重要承力构件,修理后不应破坏原结构的可检性。

6.永久性修理

对于临时性修理,必须考虑到将来实施永久性修理的可行性,不能影响永久性修理。

7.工艺性

在满足结构的基本性能与要求的

基础上,尽可能使施工方便、简单,以达到多、快、好、省的目的。

8.经济性

应尽量考虑维修成本,减少成品件的使用,减少飞机维修停车场时间,减少材料的使用,提高航空公司的经济效益。

结束语

综上所述,飞机结构修理工程师需要掌握相关维修手册及适航要求,了解航材储备、设备条件、维修人员技术水平、零部件加工能力、飞机可停车场时间、经济性论证等因素,经过分析、综合、论证,然后才能制定出一个符合适航标准的、经济的、合理的、可行的飞机结构修

理方案。飞机结构修理在飞机维修成本中占有重要比例,特别是对于老龄飞机,其结构修理停车场时间和维修成本远超过其他专业的维护和修理,航空公司结构修理水平的高低是其飞机维修水平高低的重要标志之一,是飞机出勤率和航空公司经济效益的重要制约因素。目前,各航空公司普遍存在对飞机结构修理工作和飞机结构故障预防性研究重视不够、对结构故障的预判和处置能力差、必备修理器材准备不足等情况。这些因素制约了飞机安全,增加了飞机停车场时间和维修成本,同时也会诱发人为差错。由此可见,采用合理的飞机结构修理方法并进行相应的分析十分重要。 □