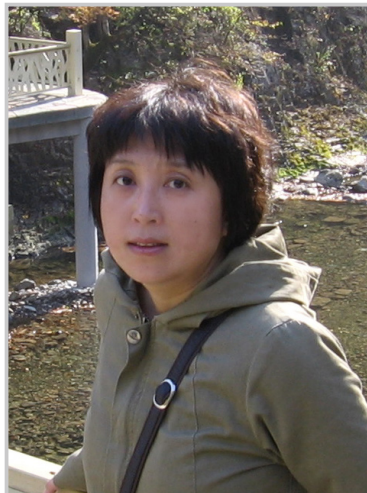


波音 737 飞机紧固件的应用研究

Fastener Application in Boeing737 Aircraft

中航沈飞民用飞机有限责任公司 崔明慧



崔明慧

中航沈飞民用飞机有限责任公司联络工程室主任,高级工程师。长期从事国内外民机生产的工程工作,对世界民用飞机领域的制造和装配技术有比较深入的研究,参与完成波音 737、787、空客 320、330,庞巴迪 Q400 飞机等多个机型的转包生产工作,以及国产 ARJ21 和 C919 飞机的研制生产。参与完成国防科工委课题“MBD 制造技术研究”、国家 863 课题“产品数据模型的构建与管理关键技术”,并对其中的制造技术、平台管理、构型管理部分撰写了专题总结。

波音 737 飞机是美国波音公司生产的中短程航线飞机,机型通用性最高,是由数万项零组件装配而成的,其中紧固件连接是最重要的装配

波音 737 飞机是美国波音公司生产的中短程航线飞机,机型通用性最高,是由数万项零组件装配而成的,其中紧固件连接是最重要的装配方式,用其连接的结构承载能力很高,在飞机上应用最广。

方式,用其连接的结构承载能力很高,在飞机上应用最广。下文详细论述波音 737 飞机各种紧固件的应用。

紧固件的分类和应用范围

在波音 737 飞机结构中存在 800 余种不同类型和规格的紧固件,仅尾段部件紧固件数量就达到 5 万余个,包括螺栓、螺母、螺钉、铆钉、高锁螺栓、环槽钉、盲铆钉、盲螺栓、销类紧固件等,这些紧固件可划分为两大基本类型:可拆卸型和永久型。

1 可拆卸型紧固件

可拆卸型紧固件包括螺栓、螺母、螺钉、托板螺母和定位销等,可以拆卸并重新安装。波音 737 飞机上采用的可拆卸型紧固件的材料为不锈钢、钛合金或铝合金。

在飞机机身内,螺栓主要用于有拆卸需要的高承载结构件,根据零组

件的结构和受力情况使用不同种类的螺栓,在受疲劳载荷连接处使用抗疲劳螺栓,受横向载荷和平面扭力处使用抗剪螺栓,而受纵向载荷和翻转扭力处则使用抗拉螺栓^[1]。波音飞机使用的抗疲劳螺栓是具有长螺纹的 12 点头凸头螺栓,在拉伸强度为 160~220KSI 的范围内使用,而抗拉伸螺栓和抗剪切螺栓可以具有六角头或埋头,带有长螺纹的用于抗拉,短螺纹的用于抗剪,应用的材料与抗疲劳螺栓相同。目前,波音系列飞机使用的标准螺栓均为滚制螺纹。

螺钉的钉杆具有全尺寸螺纹,钉头有圆形和六角形,又分为平头和带凹槽,带凹槽螺钉又分为十字形、高强度扭力型和六角止动型^[1]。在波音 737 飞机上使用的螺钉中抗拉螺钉的强度等级为 160KSI,抗剪螺钉的强度等级为 95KSI。由于紧固件

螺纹在承载时易产生刻痕效应,螺钉不能用于结构件上的载荷传递。

螺母作为与螺栓配套的紧固件,分为自锁螺母和非自锁螺母,设计上一般优选自锁螺母,但不能用于发动机进气道等容易引起飞机故障的部位。在设计强度不高的区域可使用托板螺母,波音 737 飞机多处成组使用托板螺母,托板螺母有利于实现互替换的要求。图 1 为波音 737 飞机操纵系统扭力管组件,其上的紧固件均为可拆卸的螺栓和螺母。

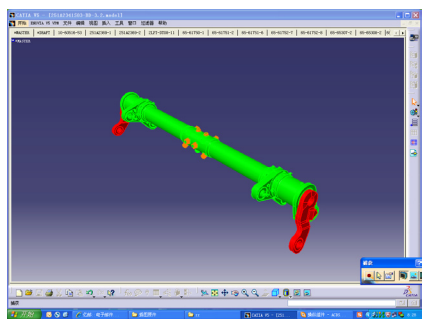


图1 操纵系统扭力管组件

2 永久型紧固件

永久型紧固件包括高锁螺栓、环槽钉和铆钉等,必须在破坏系统元素后才能拆除,不能重复使用。

铆钉是最常见的永久性紧固件,由于重量轻、价格便宜,又可使用自动钻铆设备进行机械装配,已在飞机装配中大量使用。波音 737 飞机使用的铆钉数量占紧固件数量的 60% 以上,主要分为平头、可修整平头、普通头、可修整普通头等。铆钉具有很好的延展性,能够在铆接过程中充分填满钉孔,同时又有较强的抗剪切强度,但它无法提供较高的夹紧力,因此不能用于抗拉部位。机身部位比较常用的还是普通头铆钉,可修整平头铆钉在薄板中提供更高的承载能力,在埋头处密封可提高疲劳寿命,头部具有更大的拉伸强度。铆钉一般由可锻材料制成,波音 737 飞机常用的铆钉绝大部分都是铝合金。

高锁螺栓主要用于干涉配合孔,是高强度永久性紧固件,在波音飞机

上被称为 HI-LOK。高锁螺栓是带螺纹的销和套,在规定扭矩下螺母会剪断脱离,通过螺纹夹紧并保持夹紧力,连接的疲劳性能较好。高锁螺栓不能应用在发动机进气口及其前方使用。螺栓的材料为钛、铝和合金钢,卡环材料为铝或不锈钢、合金钢等^[1]。图 2 为波音 737 机身壁板组件,其上的紧固件均为不可拆卸的铆钉和高锁螺栓。

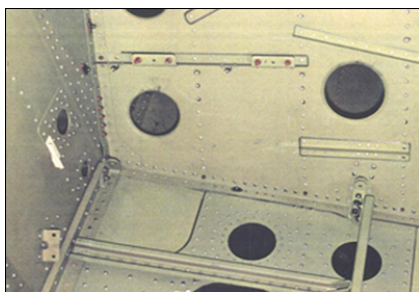


图2 壁板组件

环槽钉有较高的夹紧作用,主要用于干涉配合孔,提供高强度连接,当铆钉不能满足所在机身结构的强度要求时,设计时就会选用环槽钉。环槽钉按钉头类型分为埋头和凸头,按受力类型分为抗剪型和抗拉型,按操作方式分为拉铆型和铆铆型。环槽钉一般选用液体密封的剪切锁紧螺栓,使用铝卡环。

除上述典型紧固件外,在飞机结构中常用的还有销子、盲紧固件等。销子在飞机结构中的主要作用是锁

紧和定位,材料一般选用有一定硬度的合金钢,抗拉强度较高。波音 737 飞机上常见的有开口销、圆柱销和圆锥销,销子用作定位时通常只受很小的横向载荷,也可承受旋转力矩或弯矩,大都可以多次拆卸;用作开口销时则不能重复使用。图 3 是开口销在机身结构上的使用。

盲紧固件主要用在被连接件因一侧空间不足而无法安装常规紧固件的区域,由 1 个中空的壳体 and 1 根拉伸型内置杆组成。盲紧固件分为盲铆钉和盲螺栓两类。盲铆钉的安装成本低,但抗拉能力差,对夹层长度的要求严格,当材料的夹层厚度未知时不应使用。盲螺栓成本最高,但可用于高强度载荷区域。盲紧固件材料一般选用铝、合金钢和 A286。

紧固件的工艺安装特点

在飞机装配过程中,螺栓安装的重点主要体现在螺栓长度的确定和限定力矩的实现。螺栓光杆部分的夹层长度由被连接件的叠层总厚度决定,当光杆长度小于叠层厚度时,导致螺纹部分进入零件夹层中,应由工程部门判断此处螺栓是否受剪切载荷,是则需加大螺栓长度规格,否则允许螺纹陷入夹层中。安装螺母时,在螺母下至少应加 1 垫片以保护零件避免损伤,常规情况下螺栓头和

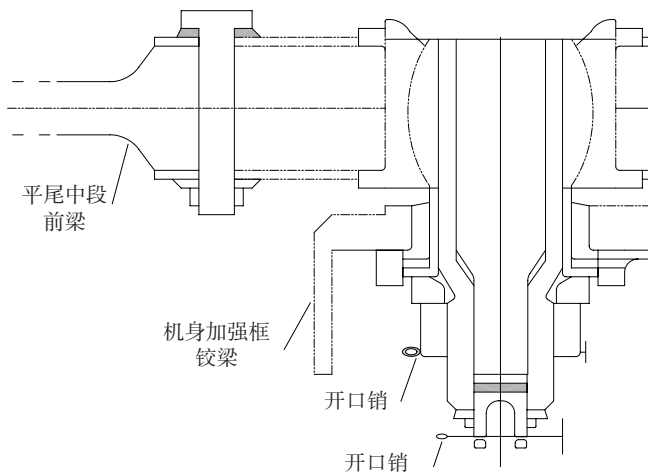


图3 开口销在飞机上的使用

螺母下可加 3 个以下的垫片,螺母拧紧后至少应有 1 圈左右的螺纹露出。在许多关键部位安装的螺栓需要设定扭矩值来限定螺母拧紧程度,工艺操作时采用限力扳手来实现规定的扭矩值。

铆钉安装在开敞区域,钉杆尾部形成镢头后会产生夹紧力来完成紧固件的安装。2017 等材料的铆钉可以直接使用,而 2024 材料的铆钉则需要进行固溶处理消除应力,并储存在冰箱中冷却备用。铆钉的安装从突出量到间隙许用值,根据机身位置的不同也各有不同的要求,比较通用的操作原则体现在铆接时被铆接件的状态上,当铆钉安装时钉头和铆钉孔中心线夹角超过 5° 时,按波音规范的要求铆钉头的支撑面必须铤平底窝,同时需铤窝的零件板材必须有足够的厚度以容纳整个铤窝,深度 h 不应超过板厚 t 的 2/3,超过将导致零件材料发生刀锋效应而撕裂。镢头可在 15° 以内的斜面或曲面上成型。如果躲避干涉造成铆钉的钉头和镢头可能骑在圆角上时应加圆角垫片。近年来自动钻铆技术已成为铆接的主流方向,既能提高生产效率和铆接质量,又能增强疲劳寿命,因此在波音 737 飞机的舱门、壁板等大型开敞组件中大量应用了自动钻铆工艺。

高锁螺栓安装时使用气压式扭矩控制工具,由于本身自锁能力高,可保证较高的稳定预紧力,可实现单面拧紧。它与卡环一起安装,卡环上有一个脆弱的六角,达到预定的扭力值时会被剪断,卡环拆除后即会损坏。它的好处是安装时不需要扭力扳手,自锁螺母可以起到同样的作用,有时用于代替卡环。当安装表面不垂直于螺母或套的中心线时会通过在钉头部和螺母接触面铤窝的方式找平后安装。

环槽钉的安装通常使用气动拉铆枪,用在铆钉不能满足强度要求的

永久性结构上。环槽钉在铝合金零件上安装时通常为干涉配合,在钢或钛合金结构上安装时为过渡配合,且安装时零件厚度有一定的限制。

盲铆钉的主要安装特点是孔必须略大于钉杆的直径,以便钉杆的膨胀部分插入。孔松动是盲铆钉在装配过程中普遍存在的问题,可以通过两种方法改善:一是计算叠层厚度与夹层长度,使材料的叠层厚度正好落在紧固件夹层长度范围的中间。二是在安装紧固件前确定零件间的所有间隙都已消除。

紧固件的选用分析

1 紧固件的防腐分析

材料选择是紧固件选用的关键因素。与飞机零件相配合的紧固件材料如果选择不当,容易引起电位腐蚀。不同金属连接时都应依据防腐原则,通过分析波音图纸发现,连接铝合金零件的紧固件一般为阳极化后的铝制紧固件,连接钛合金零件的紧固件一般为钛制或不锈钢制紧固件,碳纤维复合材料与铝合金的连接一般为钛制紧固件(如果配合的钉套或卡环为铝时,必须使用隔离垫片),铝合金与不锈钢的连接选用钛紧固件,钛对铝的连接用钛制紧固件,铝合金对钢的连接使用钢制紧固件并镀铬等。

2 紧固件的结构适用性分析

根据紧固件在结构中承受载荷的类型和大小来确定采用何种紧固件,一般来说铆钉由于成本和重量的原因是优选的抗剪紧固件,当铆钉不

能满足强度要求时应优先选用环槽钉。设计时会尽量避免紧固件的安装方向相反,但有时为防止铆接变形,铆钉头可以交替安排在被铆接件的两面。根据波音设计手册上的规定,铆钉的钉头应在强度相对较弱的零件一面;相对强度高、刚性大的零件应与紧固件的头尾相连接。螺栓螺母连接通常用在有拆卸需求的高载荷结构中,由于成本高、重量大,数量必须控制。紧固件的属性除了由其种类决定外,还与其材质有很大关系,材质通常决定该紧固件的抗剪抗拉能力。

3 紧固件孔的标准制备

为了降低安装成本,波音 737 飞机在设计上尽量选用标准的孔尺寸和公差,大量采用了牌号为 YTV、YYF 的铆钉和螺栓,使孔的尺寸保持一致,例如安装高锁螺栓时采用的直径为 $\Phi 4.750\sim 4.826\text{mm}$ 孔和安装铆钉时采用的直径为 $\Phi 4.83\sim 4.97\text{mm}$ 的孔,在每个组件上都大量存在,特殊孔径的紧固件和孔则很少出现。由此可以看出,波音十分重视标准孔和标准紧固件的选用。

各种紧固件在标准孔中以哪种方式配合,也是设计时重点考虑的问题,配合方式有过盈配合、过度配合和间隙配合 3 种配合方式,被高频率使用的高锁螺栓和环槽钉通常安装在过渡配合孔中,通常会有 0.076mm 的干涉量到 0.050mm 的间隙量。大部分结构中的螺栓都安装在紧公差 I 级孔中,螺栓和螺钉安装在紧公差绞孔 I 级、II 级或 III 级孔中的情况如

表 1 紧固件在孔内的配合关系

孔类型	紧固件应用
过渡配合	高锁螺栓或环槽钉在铝结构中
紧绞孔	连接处少于 4 个紧固件的紧公差螺栓
I 级	连接处有 4 个以上的标准螺栓和紧公差螺栓
II 级	与可拆卸壁板相连的螺栓
III 级	与可拆卸壁板相连,但不受任何载荷的螺栓

表 1 所示。

4 紧固件的成本分析

为最大限度节约成本,设计时紧固件一般使用允许的最大间距,以减少紧固件的使用数量。波音图纸中采用的紧固件间距根据紧固件类型的不同,为紧固件直径的 4~6 倍。同时按照设计惯例选择成本最低的紧固件。紧固件的安装成本由低到高依次排列如下:铆钉 < 环槽钉 < 高锁螺栓 < 螺栓。相同规格的紧固件,其成本随材料的变化而不同。材料成本由低到高依次排列如下:合金钢 < 铝合金 < 不锈钢 < 钛合金,这里的排序是指常见的几种金属,特殊类型的合金钢价格远高于钛合金。

紧固件故障在飞机上的返修

紧固件由于价值较低,而且生产紧固件需要专业的资质,所以对飞机装配厂来说,所谓对紧固件的返工,一般是指对飞机机体零组件的挽救措施,也就是对紧固件孔的返修。在飞机装配制孔时对孔的尺寸、位置、垂直度等造成的错误进行纠正和修理后,很少能再符合原有的设计要求,这时就要通过紧固件对这些故障孔进行弥补,现场处理这些问题的方法一般有 3 种:一是修整故障孔的状态,扩大尺寸达到下一级加大紧固件的标准,然后安装加大紧固件;二是对故障孔进行扩孔加冷冻堵塞处理,然后再在中心孔位置安装紧固件;三是对故障孔进行堵孔,在新的位置进行重新钻孔。

对第 1 种方法,紧固件需通过加大方式进行返修时,铆钉与螺栓的返修方式是不同的。当铆钉拆除后,修整孔的尺寸和孔壁的质量,可使用大一号直径的铆钉,铆钉直径增大 0.8mm (参考 BACR15FV 系列),尺寸加大后的孔和铆窝应与对应尺寸的铆钉匹配。如果在薄蒙皮上使用加大规格的铆钉而导致出现锐边,则应保持原铆钉的铆窝深度,安装后将

突出的钉头铣平。在很多时候最好的方法是用一个加大的凸头铆钉代替原有的铆钉,在波音制造规范中对返工铆接中孔的修整及重新安装有具体的规定。当由于图纸规定的标准规格螺栓孔操作超差(过大)或孔质量原因必须扩孔以挽救材料损伤时,一般使用加大尺寸的同种表面处理标准的一级加大和二级加大螺栓,即 X 和 Y 级特制加大紧固件。用于二级加大的紧固件不能连续超过 3 个孔,加大后的紧固件孔的最小边距应确保 1.8 倍直径。高锁螺栓和锁紧螺栓在飞机的框组件中可以互换使用,在返修时也可使用专门用于返工的高锁螺栓系统来代替图纸中规定的高锁螺栓和锁紧螺栓。返修螺栓有 0.8mm 和 0.4mm 两种加大型,制孔要求与一般螺栓的制孔要求相同。自锁板制金属螺母可以代替标准的高锁螺栓的卡环,扭力要求须参见相应的波音制造规范。

对第 2 种方法,当故障孔的超差尺寸过大(二级加大以上)无法使用加大紧固件,或使用下级加大紧固件会改变载荷路径,或紧固件孔的边距状态不允许(扩孔会造成短边距),且受紧固件数量限制无法取消该处的紧固件孔时,就会采用冷冻堵塞的方法。冷冻堵塞需在液氮下冷冻产生收缩后立刻压入孔中,适合永久干涉配合紧固件孔,例如用于高锁螺栓孔和实心铆钉孔内,零件材料厚度在 1.6mm 以上,或组件的层数在 3 层以内。在边距和间距符合设计规定的情况下,用铆窝或垫片固定住冷冻堵塞,使用之前推荐的干涉量用于

铝合金冷栓,采用冷冻堵塞的直径可由波音的联络工程手册查出,一般为 4.5h,组件层数多的可以考虑分层堵。故障孔加大后可能导致短边距问题的不能应用冷冻堵塞。冷冻堵塞的安装见图 4。

对第 3 种方法,在飞机装配的过程中偶尔会出现操作者钻铆失误,形成多余孔或过深的钻点,这时会采用紧固件堵孔的方法。理论上来说,飞机零件上的所有开孔都应该被堵住,因为这些开孔会使孔周围产生应力集中,堵孔能够改善结构的疲劳质量。采取堵孔方式的多为铝合金钣金零件,波音一般习惯用材料为 2024 的 DD 铆钉进行堵孔。若 d 为故障孔直径,故障孔为 4# 孔以下 ($d < 3.2\text{mm}$) 时,且该孔的边距(孔中心到零件边缘的距离)和间距(孔中心到临近孔中心的距离)在 $2d$ 以上,就可以进行堵孔。在零件非配合表面堵孔时用埋头铆钉堵孔,在零件配合表面堵孔时,铆窝后用埋头铆钉堵孔。对于两面都是配合面的零件,采用双面埋头后铣平,单面或双面铆窝最大深度不能超过材料厚度的 $2/3$ 。堵孔不适用于高承压区域及压力容器附近。

结束语

以上分析总结了波音 737 飞机常用的紧固件及其应用,作为飞机零组件连接的介质,紧固件在飞机装配中起着重要作用,从钉头形状、材质、表面处理到规格类型,每个参数都关系到连接件的强度和疲劳寿命,波音飞机中应用的这些紧固件无论从设计的严谨性还是制造的合理性,都具有很强的参考价值。

参考文献

[1] 马占永. 飞机设计手册. 北京: 北京航空工业出版社, 2000.

(责编 良辰)

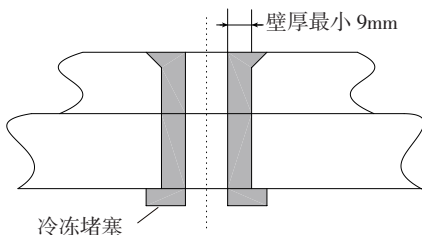


图4 冷冻堵塞的安装