



飞机制造技术丛书

飞机金属 胶接结构 制造技术

马名伦 等编著

飞机制造技术丛书

飞机金属胶接结构制造技术

马 名 伦 等编著

国防工业出版社

(京) 新登字 106 号

内 容 简 介

本书介绍了金属胶接技术特点;铝蜂窝夹芯制造技术;铝蜂窝夹芯型面加工技术;金属胶接零件的表面制备技术;金属胶接构件的装配和固化;胶粘剂和辅助材料;金属胶接构件的质量控制。内容丰富,文图并茂。

飞机制造技术丛书

飞机金属胶接结构制造技术

马名伦 等编著

责任编辑 余发棣

*

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 100044)

新华书店经售

北京市怀柔县王史山印刷厂印刷

*

850×1168 毫米 32 开本

印张 5 $\frac{3}{4}$ 146 千字

1994 年 1 月第一版 1994 年 1 月第一次印刷 印数: 001 600 册

ISBN 7-118-01109-6/V·93 定价: 5.45 元

中国航空学会
《飞机制造技术丛书》编委会

主 编：罗时大

副主编：马业广

编 委：董 孝 程宝藻 杨彭基 唐荣锡
屠德彰 陆颂善 郭兴中 戴世然
董德馨 武厚忠 孙肇卿 黄道宏

责任编辑：余发棣

秘书组：梁国志 张士霖 杨奇光

前 言

《飞机制造技术丛书》是由中国航空学会组织编写的。成立了编委会，编委们都是中国飞机制造技术专业的学者和专家。他们毕生致力于中国飞机制造技术专业的生产、科研、教学、管理工作，有丰富的理论和实践经验，在此基础上，组织、编写了这套《丛书》。

《丛书》编写的目的是：既要总结我国三十多年关于飞机制造技术的经验，又要有选择地吸取国外的先进的飞机制造技术，总结出一套具有中国特色的飞机制造技术的基本经验，为总结经验、积累资料、培育人才、发展新技术打下基础，可以说，这是一项基础工程建设，具有重大的现实意义。

《飞机金属胶接结构制造技术》是《丛书》中的一个分册。

本分册共分七章：第一章概述；第二章铝蜂窝夹芯制造技术；第三章铝蜂窝夹芯型面加工技术；第四章金属胶接零件的表面制备技术；第五章金属胶接构件的装配和固化；第六章胶粘剂和辅助材料；第七章胶接构件制造过程中的质量控制。

航空航天工业部 625 研究所早在 1958 年就开始进行金属胶接蜂窝结构课题的研究工作。经过长期的研究，在此科学领域中取得一系列成果，这些成果在我国自行设计的新飞机上得到了应用，提高新飞机的技术性能，增强了战斗力。在此基础上，将所得的大量技术资料、技术数据、设备等总结整理成书。因此，凡是曾经参加过金属胶接结构课题研究工作的同志，都为本书的出版作过一定贡献。还有一些兄弟科研单位，长期和 625 所金属胶接课题组进行合作，因此他们也对本书的出版作过一定贡献，在此特向他们表示衷心地感谢。

本书由航空航天部第 625 所高级工程师马名伦主编；由第

625 所总工程师胡建国研究员主审。参加本书编写的有下列人员：

第一章由胡建国编写；第二章由寇耀文编写；第三章由罗载华编写；第四章由焦洁清编写；第五章由马名伦、刘见如、刘柱林、张箕运编写；第六章由马名伦、吴石民编写；第七章由雷衍日、马名伦、吴善鹏编写。

由于编者水平有限，难免有不少错误，请读者多多批评指正。

编 者

目 录

第一章 概述	1
一、飞机金属胶接技术特点	1
二、飞机胶接结构的应用	6
三、飞机金属胶接结构技术展望	13
第二章 铝蜂窝夹芯制造技术	17
一、正六角形铝蜂窝夹芯制造概述	17
二、铝箔的表面处理	21
三、铝箔涂胶	31
四、蜂窝板叠合, 固化和夹芯拉伸	39
五、夹芯标准和性能测试	46
第三章 铝蜂窝夹芯型面加工技术	52
一、铝蜂窝夹芯型面机械加工的特点	52
二、铝夹芯型面加工的固持方法和使用的固持、稳定剂	53
三、加工铝夹芯用的刀具和切削用量	56
四、预弯曲法加工夹芯型面	61
五、蜂窝夹芯型面的仿形加工法	69
六、夹芯型面的数控 (NC) 加工法	75
七、直接得出型面法和压缩成形法	77
八、几种加工方法的比较	80
第四章 金属胶接零件表面制备技术	83
一、表面性能与胶接性能的关系	83
二、铝合金表面制备技术	89
三、钛合金的表面制备技术	98
四、镁合金的表面制备技术	103
五、其它金属零件表面制备技术简介	106

第五章 金属胶接构件的装配和固化	110
一、预装配	111
二、零件涂敷胶粘剂和夹芯的清洗处理	115
三、蜂窝胶接构件、钣金胶接构件的胶接装配	118
四、混合结构的装配	120
五、装配后的固化	123
六、固化后的检查	132
七、固化模具	133
第六章 胶粘剂和辅助材料	135
一、胶粘剂的种类	135
二、对胶粘剂的要求	139
三、常用胶粘剂的品种	152
四、装配固化过程用的辅助材料	153
第七章 胶接构件制造过程中的质量控制	155
一、生产环境、生产设备控制，生产人员培训	155
二、材料的控制	157
三、制造过程的质量控制	158
四、胶接构件的质量检验	161
五、胶接构件无损检测方法和设备	163

第一章 概 述

一、飞机金属胶接技术特点

利用胶粘剂本身分子间的内聚力以及与被粘金属表面间的粘附力,把金属被粘物连接成一个整体,并具有一定强度的方法,称为金属胶接(或粘接)。

主要利用金属胶接方法制成的飞机结构,即为飞机金属胶接结构。随着金属胶接技术不断发展,飞机金属胶接结构的应用也已日益广泛,并正向着主承力结构应用过渡。

金属胶接的一般程序是先对金属零件的被粘表面进行必要修配,使之相互配合良好;再根据材质及结构性能要求对被粘表面进行表面处理,涂布胶粘剂;并将被粘表面合拢装配至要求形状;最后按照胶粘剂要求的条件完成固化,实现金属胶接。

1. 金属胶接技术的优缺点

近四十年来,胶接连接已经继机械连接(铆接、螺接等)和焊接之后,获得了越来越广的应用,进入了国民经济和日常生活的很多领域。几乎可以说,它已一跃而与机械连接和焊接同样的重要和普及,跻身为当代的三大连接技术之一。

与机械连接及焊接相比,胶接具有下列主要优点:

(1) 胶接接头是面际连接。胶接层均匀、连续,大大改善了胶接被粘物之间的相互支持状态,提高了结构抗压强度。例如,胶接的蒙皮-桁条壁板,一般可比铆接的同类壁板提高抗压强度约10%以上。

(2) 胶接接头不需开连接孔,不会形成孔边应力集中;也不会产生类似焊接的热影响区;不削弱被粘材料,可有利于减轻结构重量和提高疲劳强度。据北美航空公司试验,分别用胶接、铆

接和点焊制成典型的蒙皮-桁条构件，在受拉力载荷时，胶接件的抗剪强度是点焊件的 1.8~5.3 倍，是铆接件的 1.6~5.5 倍。铝合金薄板胶接结构的疲劳寿命要比点焊结构的高 20 倍，比铆接结构的高 15 倍。

(3) 胶接可以连接材料相同的零件，也可连接材料不同的零件，如铝与钛合金的胶接。胶接还可连接材料厚度相差悬殊的零件；或是连接多层材料；更适合于薄壁件的连接。

(4) 胶接件不存在由机械连接的紧固件或焊缝引起的表面凹凸不平。胶接件表面光滑、外形美观。用于飞机表面构件时，可取得优良的气动效果。

(5) 胶接件的胶缝在金属被粘物之间形成了非金属隔离层，具有较好的绝缘（热、电）性能和抗震性能。胶接还可减少不同金属之间的接触腐蚀。

(6) 胶层致密的胶接件具有良好的密封性能，可用于水密、油密或气密结构。在机械制造业中还常用于金属件的堵漏和修补。

(7) 胶接可与铆接、螺接或焊接联合应用组成胶-铆、胶-螺或胶-焊结构。此时胶层起到均匀连接及减磨作用，与单一的机械连接或焊接结构相比，可提高结构疲劳寿命。

(8) 胶接连接减少了结构零件数量。特别是大幅度减少了机械连接紧固件或紧固标准件。

(9) 胶接工艺比较简便，较少复杂操作，不要求高等级的技术工人。胶接结构的装配工作量小，众多零件往往可以一次固化完成胶接。胶接的制造成本低，胶接结构与铆接结构相比，一般可降低制造费用 20~30%。

鉴于以上一系列优点，胶接已在不少场合取代了机械连接和焊接，特别在飞机结构中取得了广泛的应用。但胶接也还存在着明显的弱点和不足，影响和限制了飞机金属胶接结构的扩大应用，尚待尽早克服。胶接存在的主要问题是：

(1) 虽然胶接件的抗拉及抗剪性能很高，但抗剥离强度很低，抗不均匀扯离能力很弱。胶接件设计时，必须注意扬长避短，充

分发挥胶接特长，采取提高抗剥离能力措施，应使胶层主要承受均匀抗拉或剪切载荷。

(2) 胶接件的工作温度较低。目前主要结构胶粘剂的工作温度一般限于 260°C 以下。凡综合性能要求很高，受力复杂的高温结构采用胶接连接还有很多困难。

(3) 承力结构用的胶粘剂几乎都要采用加温加压固化的胶接工艺。多数结构胶粘剂的固化温度高于 150°C 、固化压力高于 0.3MPa 。这不仅提高了胶接工装和设备的复杂程度、增加了成本，还会造成外形复杂的零组件难以胶接。

(4) 必须仔细操作、严格控制，才能保证胶接质量。目前虽已有了多种胶接质量无损检测仪器和方法，但检验技术还不够完善。如对虽已贴紧但没有粘合、或是粘附强度很低的胶接件，至今还不能可靠地判别其胶接质量。

2. 飞机金属胶接技术特点

近三十年来，金属胶接技术作为一种有效的连接方法，已经在国民经济的各个领域（如轻工业、建筑业、以及机械制造业等）越来越得到广泛应用。特别在航空航天领域中，由于高性能产品对新技术的依赖性，使胶接技术发挥了更显著的作用。与一般机械行业的胶接制品相比，飞机金属胶接结构具有下列重要特征：

(1) 飞机结构应具有高的结构效率，全面的性能要求。必须进行高效的胶接结构设计，先进的胶接制造工艺，以充分发挥胶接技术的优越性。

(2) 飞机结构受力复杂。胶接构件往往需要同时承受拉伸、压缩、剪切、扭转、剥离、弯曲等载荷中的多种载荷。有的还要承受振动、交变疲劳等动载荷。某些构件还要考虑蠕变作用。

(3) 飞机结构的使用环境条件恶劣，不仅要承受地面的湿热、干冷或海洋盐雾气氛的环境作用，还要承受高空低温（如 -55°C ）或高速飞行的气动热（ 175°C ，甚至更高），并有频繁的高低温交变作用。另外，还有发动机区的局部高温作用和大气中工业废气、

紫外线等对材料老化的有害作用等。

(4) 航空产品要求可靠性高。新一代民用飞机的机体要求具有 20 年及 50000 飞行小时的使用寿命。歼击机寿命要求也已提高到了 20 年及 5000 飞行小时。随着飞机功能扩大及价格大幅度提高,对飞机机体寿命的要求还有不断提高的趋势。

(5) 飞机的结构零件数量多、形状复杂、要求有准确的空气动力外形。还必须保证具有良好的互换协调性能。

上述飞机结构的苛刻要求必然对飞机金属胶接结构带来了严格的性能要求。为此,飞机金属胶接结构不仅要具有优异的单项性能,更重要的是必须具有优异的综合性能。由此而决定了飞机金属胶接技术所必须兼备的五大特点如下:

(1) 根据胶接特点发展了多种胶接结构形式,减轻了结构重量,取得了显著效益,在飞机机体结构中扮演了重要角色。

① 胶接夹层结构。这是一种在两层薄而强面板材料之间夹入轻质夹芯(如轻质木、泡沫塑料、波纹板或各种蜂窝夹芯等),相互胶接构成的一种板壳结构。具有较高的比强度和比刚度。其中以蜂窝夹层结构应用最广。夹芯对面板起到均匀连续的支撑作用。在相同结构重量下,蜂窝夹层结构比常规铆接结构提高了结构刚度及抗压临界应力,可减轻结构重量达 15~30%。蜂窝结构还具有消音和抗声疲劳性能。

② 胶接波骨板结构。由面板(有时还带有垫板)与波骨板零件胶接组成的一种板壳结构。结构比较简单,同样可获得较高的结构效率,减轻结构重量。适用于次承力壁板构件。

③ 胶接层板结构。由多层薄板胶接成的板壳结构,构成多通道传力,有利于破损-安全设计,提高疲劳强度。适用于蒙皮或梁、肋等内部构件。蒙皮壁板还可与长桁胶接,构成承力蒙皮壁板。

(2) 必须采用综合性能优异的结构胶粘剂。

飞机金属胶接结构采用的胶粘剂应具有较高的强度和韧性,体现在具有较高的剪切强度和剥离强度。同时还应具有较高的动态性能、耐介质性能、耐气候老化性能和工艺性能。多种胶粘剂

应形成系列（构成胶粘剂体系），供配套使用。

国外用于飞机金属胶接的结构胶粘剂都已规定了详尽的要求，制订出了相应的标准。例如：

美国军用标准：

MIL-A-5090E 飞机结构用金属-金属耐热胶粘剂；

MIL-C-7438F 夹层结构用铝芯子材料；

MIL-A-25463B 金属夹层结构用胶膜。

美国联邦标准：

MMM-A-132 金属与金属胶接的耐热结构用胶粘剂；

MMM-A-134 金属与金属结构胶接环氧树脂胶粘剂。

美国航天材料标准：

AMS 3106 抑制腐蚀底胶

AMS 3688 蜂窝夹芯拼接结构发泡胶（ $-67\sim+188^{\circ}\text{F}$ ）

AMS 3689 蜂窝夹芯拼接结构发泡胶（ $-67\sim+350^{\circ}\text{F}$ ）

类似的胶粘剂标准极多，不一一列举。

（3）先进的飞机金属胶接结构应该是耐久胶接结构。必须全面贯彻将设计、材料、工艺集于一体统盘考虑的“先进胶接体系概念”。

“先进胶接体系概念”是国外在 70 年代中期经过大量分析和研究试验后提出的胶接新概念。它认为：为研制一个真正耐久的胶接结构，必须一方面选用耐久的胶粘剂体系和耐久的胶接表面制备方法，使胶粘剂与被粘金属构成确能耐久的界面结合层；另一方面对胶接接头的胶层还应采取严密的防护措施。只有这样才能全面杜绝胶接结构的薄弱环节，延长使用寿命，形成真正的耐久胶接结构。这一概念的提出，在国外被认为是胶接技术发展的一次“革命”，极大地推动了胶接结构应用，进入了“第三代胶接技术时期”。自 70 年代后期起，飞机金属胶接技术已经向主承力结构的应用扩展。

（4）为保证飞机金属胶接结构性能可靠，必须建立严密的质量保证体系，对有关胶接质量的各个环节实施可靠的质量控制。

(5)飞机金属胶接结构的制造不能违背飞机常规制造特点,同样应满足飞机外形及其互换协调的要求。

飞机金属胶接结构在绘制结构模线及制造胶接工装时,必须计及固化后的胶层厚度影响。金属板-板胶接及板-芯胶接固化后的胶层厚度并不相等。同一结构采用不同的胶粘剂时,固化后的胶层厚度也并不相同。均应通过试验确定。

用于胶接的钣金零件必须提高成形精度,以满足胶接装配对胶接面的贴合要求。胶接模具设计及固化方法选用时,还必须考虑适应对胶接件的气动外形要求。

飞机金属胶接技术的上述特点,同时也就是研制生产胶接结构时所必须注意的要点。

二、飞机胶接结构的应用

目前飞机上应用的金属胶接结构形式主要有以下几类:

第一类,蒙皮类胶接壁板。如机翼壁板、机身壁板、尾翼壁板等,见图1-1。大多具有曲面外形。

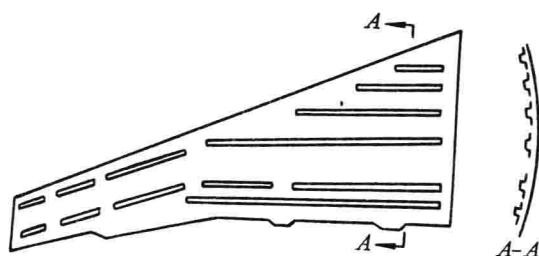


图 1-1 典型胶接蒙皮壁板

这类壁板又可分为两种:

第一种,钣金件与长桁(各种剖面形状)的胶接。

第二种,蒙皮与多层加强板的胶接,或与波骨板的胶接。

有的蒙皮壁板上还需胶接钛止裂带。

第二类，梁、肋类胶接构件。如翼梁、翼肋、油箱隔板及机身隔板等，大多为平面板件，见图 1-2。

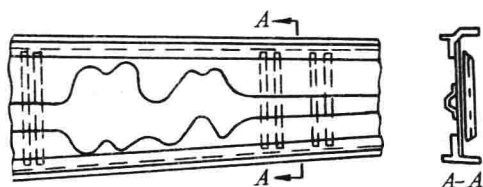


图 1-2 典型梁、肋类胶接构件

这类构件也可分为两种：

第一种，梁、肋或框的腹板与加强型材、加强板或止裂带等胶接。

第二种，由双层板件胶接成梁、肋或框的腹板，构成双通道传力结构。

第三类，全高度蜂窝结构胶接构件 如襟翼、副翼、方向舵、升降舵、调整片、减速板、鸭翼等。一般由面板、端肋梁及全高度蜂窝夹芯胶接而成。此类胶接构件剖面形状以楔形居多，见图 1-3。

第四类，壁板类蜂窝结构胶接构件 一般由面板、边框或端肋及厚度变化不大的蜂窝夹芯胶接而成。如翼刀、腹鳍、折流板等。也有较复杂的双曲面蜂窝壁板，如机身蜂窝壁板等。大型飞机的操纵面构件，大多采用壁板类蜂窝结构形式，见图 1-4。

1. 国外应用概况

飞机胶接结构应用目的主要是减轻结构重量和提高疲劳性能。自本世纪 40 年代英国在“大黄蜂”号战斗机上首先应用胶接结构成功以来，胶接结构已不同程度地被应用到了各种飞行器上。至今，国外采用金属胶接的机种已达百种以上。金属胶接结构早已成为飞机机体的重要结构形式之一。

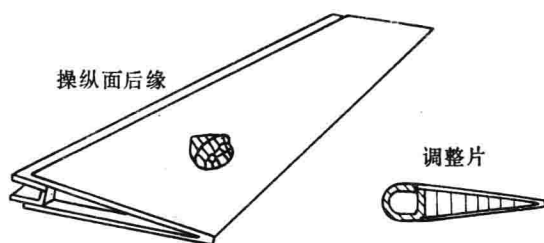


图 1-3 全高度蜂窝结构胶接构件

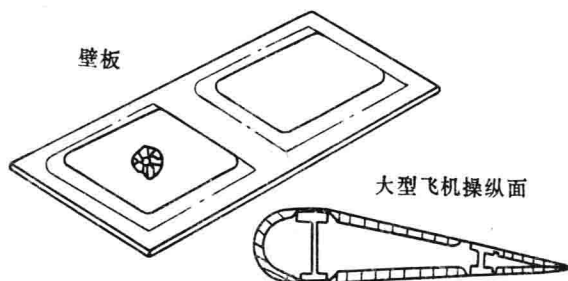


图 1-4 壁板类蜂窝结构胶接构件

西欧各国的胶接技术以发展钣金胶接结构为主。如早期的荷兰福克-27“友谊”号客机，共采用 400 余件胶接件，占整体表面积 55% 左右。其机翼胶接壁板尺寸达 $1.3 \times 4.9\text{m}$ ，胶接翼梁长达 10m。1968 年投入航线的 F-28“伙伴”号荷兰客机，其胶接构件已扩大到了整机的 75%。近期的 F-50、F-100 客机依然大量采用了钣金胶接结构。英国早在 50 年代研制生产的“彗星”号和“子爵”号等客机上就已应用了胶接结构。到 70 年代初生产的“三叉戟”客机上采用了更多的胶接结构，其胶接壁板约占全机表面的三分之二，大量内部构件也采用了胶接构件，可见图 1-5。近期的 BAe-146 客机在机翼、机身及尾翼上都采用了蒙皮-长桁类胶接壁板结构，降低制造成本 20%，减少连接件 10 万件以上。欧洲联合研制的“空中客车”号 A-300B 系列大型客机，在机身壁板、

机尾翼后梁以后部位、操纵面、整流片、盒梁、内部壁板及地板等部位也都采用了胶接结构。在军用机应用方面,瑞典的 Saab 系列三角翼全天候歼击机,从 Saab-29 到 Saab-35 都采用了胶接结构,其中 Saab-35 机采用胶接构件多达 300 余件。

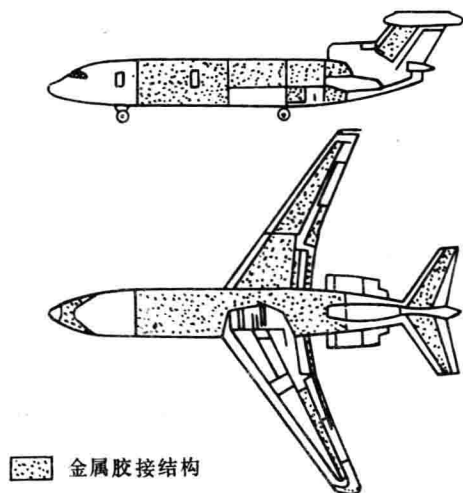


图 1-5 “三叉戟”客机金属胶接结构应用

美国采用的胶接结构以蜂窝结构为主。首先在战斗机上应用。如 F-86、F-100、F-102 等战斗机都采用了蜂窝结构操纵面。50 年代末的 B-58 型轰炸机是美国早期采用金属胶接结构的代表,全机表面积的 90% 采用了胶接蜂窝结构,成为结构重量最轻的一种轰炸机。后期的 F-111 战斗机的全机表面积的 80% 左右采用了约 300 块胶接构件,见图 1-6。军用运输机 C-141 型采用了 560m^2 的胶接结构,C-5A 运输机采用胶接结构达 960m^2 。继军用机之后,美国在客机上(如波音 700 系列客机)也广泛采用了胶接结构。60 年代末期研制的 B-747 客机采用铝蜂窝结构达 334m^2 ,采用钣金胶接结构达 925m^2 。70 年代洛克希德公司的 L-1011 “三星”号大型客机重点发展了钣金胶接结构,采用了大面积的胶接壁板。其