

航空蜂窝结构制造工艺

国际航空编辑部

1980.3.

国外航空技术专题资料
航空蜂窝结构制造工艺

※

国际航空编辑部
(北京市1652信箱)

※

内部发行

1980年4月 书号: 117

前 言

本书再版中详细地介绍了航空工业广泛应用的胶接、钎焊和焊接蜂窝夹芯结构的设计和生 产问题。

更新和扩充了有关非金属材料、铝合金和钛合金，以及不锈钢制蜂窝夹芯产品的结构，强度和重量方面的资料。

有关蜂窝夹芯制造工艺和构造的各章，在原有基础上，根据各国工业上的最新成就进行了改编。

较详细地介绍了蜂窝夹芯和带有这些夹芯的部件的机械化和自动化生产和检验用的设备和工艺装备。还增加了蜂窝结构修理一节。

本书可供航空工业工程技术人员使用。同时对于航空院校的教师和学员也有裨益。

目 录

再版序言	(1)
初版序言	(3)

第 一 部 分

蜂窝夹芯组件和部件的结构及强度	(5)
-----------------	-----

第一章 关于蜂窝结构的概述	(5)
---------------	-----

1.1 蜂窝夹芯组件和部件的结构特性	(5)
1.2 蜂窝夹芯的特性	(12)
1.3 三层结构连接的结构——工艺方式	(20)
1.4 蜂窝结构的应用	(24)

第二章 结构参数对三层结构强度和重量的影响	(31)
-----------------------	------

2.1 结构参数的研究	(31)
2.2 不锈钢和钛合金焊接蜂窝板件结构参数的研究	(43)
2.3 不锈钢和钛合金钎焊蜂窝板件结构参数的研究	(48)

第三章 蜂窝夹芯组件和部件的结构形式	(53)
--------------------	------

3.1 非金属材料胶接结构的设计	(53)
3.2 铝合金胶接结构的设计	(55)

- 3.3 不锈钢和钛合金钎焊结构的设计..... (65)
- 3.4 非金属材料 and 铝合金蜂窝夹芯板件的修理..... (71)

第 二 部 分

- 蜂窝夹芯和蜂窝结构的生产..... (85)

第四章 非金属材料蜂窝夹芯和蜂窝结构的生产..... (85)

- 4.1 对非金属蜂窝结构的基本要求..... (85)
- 4.2 非金属材料的蜂窝夹芯和结构的制造方法..... (87)
- 4.3 用预先浸胶和成型的棉布及玻璃布制造蜂
窝夹芯..... (89)
- 4.4 用预先成型后浸胶的玻璃布制造蜂窝夹芯..... (93)
- 4.5 用拉伸蜂窝叠的方法制造布蜂窝夹芯..... (96)
- 4.6 用立体编织法制造蜂窝夹芯..... (107)
- 4.7 纸蜂窝夹芯的制造..... (109)
- 4.8 用聚合纸制造的蜂窝夹芯..... (112)
- 4.9 非金属蜂窝夹芯板件的装配和胶接..... (117)
- 4.10 蜂窝夹芯整流罩的装配和胶接..... (127)

第五章 铝合金蜂窝夹芯和蜂窝结构的生产..... (131)

- 5.1 用成型铝箔制造蜂窝夹芯块及其胶接..... (131)
- 5.2 制造蜂窝夹芯叠的工艺过程..... (135)
- 5.3 蜂窝夹芯叠生产过程的机械化和自动化..... (143)
- 5.4 蜂窝块、蜂窝夹芯和蜂窝夹芯叠的机械
加工..... (158)
- 5.5 蜂窝叠毛坯的拉伸, 蜂窝夹芯端面的滚
压和侧棱面的成形..... (169)

5.6 蜂窝夹芯的检验	(187)
5.7 对供装配和胶接的零件的要求	(189)
5.8 蜂窝夹芯结构的装配和胶接方法	(189)
5.9 蜂窝夹芯、面板和骨架零件在装配和胶接前的准备	(209)
5.10 作好胶接准备的零件的保管和运输	(215)
5.11 表面准备质量检验	(217)
5.12 蜂窝结构零件表面的涂胶	(220)
5.13 胶膜的下料和滚压	(229)
5.14 板件类组件的装配和胶接	(232)
5.15 直升机桨叶后段件的装配和胶接	(238)
5.16 襟翼、舵面和其他部件上蜂窝段的装配和胶接	(247)
5.17 胶接组件的最后检验方法和检验工具	(249)

第六章 不锈钢和钛合金钎焊和焊接蜂窝结构的

生产	(255)
----	-------

6.1 概述	(255)
6.2 蜂窝夹芯的制造方法和工艺过程机械化用的设备	(257)
6.3 蜂窝夹芯的机械加工	(264)
6.4 蜂窝夹芯制造质量的检验	(270)
6.5 钎焊前零件的预装配	(271)
6.6 钎焊前零件表面的准备	(272)
6.7 结构的装配和钎焊	(272)
6.8 钎焊质量的检验	(278)
6.9 全焊蜂窝壁板的制造	(281)
参考文献	(287)

原文再版序言

《蜂窝结构生产》一书，从初版到现在已经过去九年。在这些年中，蜂窝结构的应用范围显著地增加了，尤其是在航空产品方面。

例如，在波音747飞机上的蜂窝胶接部件面积为3200米²、DC-10飞机上为850米²、C-5A飞机上为2300米²、洛克希德公司的L-1011（三星）飞机上为2800米²等。

蜂窝部件应用的部位甚为广泛。如果说以前带蜂窝夹芯的组件只装在结构承受小载荷的部位（舵面尾段、调整片、舱门、隔板、行李架等）上，那么在最新型的飞机和直升飞机上，蜂窝结构则取代了那些承受高载荷部件上的铆接件，如导流片、阻流板、襟翼、水平安定面、垂直安定面、副翼等。

蜂窝结构能制成高承载的，是因为有了新型强度较高，而又可靠的胶粘剂、金属箔、面板、骨架材料和焊料。

由《应力蒙皮》公司制造的钛合金焊接蜂窝板件可以解决发动机短舱和排气口零件的耐热性问题。

在许多飞机的发动机区域内，铆接板件已用具有较高抗震动载荷的焊接蜂窝板件代替。

由于先进的工艺过程和机械化、自动化的现代化设备的研制成功，从而促进了蜂窝结构广泛的采用。

零件涂胶表面准备的新方法（铬酸阳极化、用过氯乙烯或三氯乙烯除油），静电场喷液态胶，热压蜂胶接等获得很大发展。

苏联和国外都掌握了制造蜂窝叠的新专用化设备。

本书再版时介绍了上述全部内容。有关部分作了重要改编，并补充了一些新的章节，因此更改了本书的名称。

第二章和第三章补充了关于试样和实物试验方面的最新资料，还介绍了不同类型的蜂窝结构的设计方法，这些方法也包括近年来的实际经验，新增加了一节“蜂窝结构修理”。

专讲非金属材料胶接蜂窝结构生产一章做了重要改编。删去了其中属于建筑工程方面的资料，又新增加了一节，在这一节中详细叙述了“Номекс”聚合纸蜂窝夹芯结构的制造方法和设备，这种夹芯在国外得到了广泛应用。

关于介绍铝合金胶接蜂窝结构一章做了重要的修改。在这一章里详细阐述了生产蜂窝夹芯叠自动化生产线的新设备和除油、涂液态胶、滚压胶膜和胶接用的设备。本章检验一节也做了补充和更详细的说明。

在第六章里介绍了不锈钢和钛合金的钎焊和焊接蜂窝结构生产及检验的方法和设备。这一章大部分作了改编和修改。

原文初版序言

在现代飞行器的结构中，广泛应用板料制成的零件和组件，而在这种零件和组件上铆有不同形状的型材来提高刚性。近几年来，飞行器的这类构件大多数被夹层结构所代替，夹层结构是由两块面板与承受载荷时使结构具有稳定性的内部夹芯组成的。特别在飞机制造业中，夹层结构得到了极其广泛的应用。

夹层结构与铆接结构的差别是它具有较高的比强，零件数量少，空气动力性能改善，而且制造时省工。这种结构的应用实例如下：直升飞机桨叶的后段件（波音·弗托尔 107、西柯斯基 S—61 等），飞机的板件和尾翼部件（波音 707、“慧星”、B—58、B—70、DC—8 等）一次使用的产品的个别组件（隼式导弹、咖姆 77A、猎犬式导弹、马斯式导弹、“水星”人造卫星等）。

直升飞机桨叶后段件应用蜂窝夹芯后，随着结构的改进，桨叶寿命由 500~600 小时提高到 1000~1500 小时。“斗牛式” B—61 导弹的弹翼，由于采用了蜂窝结构，其零件数量由 1100 件减少到 90 件。由于用蜂窝结构代替了铆接结构，F—86 型飞机减速板的重量减轻了 30%。

胶接是非金属材料和铝合金蜂窝结构构件连接的主要方法。在制造不锈钢和钛合金的蜂窝结构时，要用点焊焊接蜂窝夹芯，而面板与夹芯则用钎焊连接。

在正确的选择材料、结构参数以及制造和检验方法与设备的条件下，应用蜂窝结构可得到高技术经济指标。这类问题在

本书中也有阐述。本书中在介绍作者个人经验的同时，也系统地介绍了苏联及国外一些科研机构和工业企业从事这项工作的成果。本书是由两部分组成的。

第一部分中是研究蜂窝结构的设计问题，第二部分中是阐述其生产与检验方法和设备。

第一章的主要内容是介绍蜂窝结构特性，蜂窝夹芯特点和在航空产品及国民经济各部门中应用的实例。第二章叙述了非金属材料、铝合金、钛合金和不锈钢制蜂窝结构的重量和强度特性。第三章叙述了带蜂窝夹芯的组件与部件的结构形式。

第四章阐述了非金属材料蜂窝夹芯的制造方法，规定了规范并介绍了机械加工设备。在这一章里也详细地介绍了纸制蜂窝夹芯的生产和检验流水线，叙述了蜂窝结构的装配方法并举出个别产品的胶接实例。第五章汇集了铝合金蜂窝夹芯和蜂窝结构生产的有关资料。第六章叙述了钎焊蜂窝结构的生 产问题。

第一部分 蜂窝夹芯组件和部件 的结构及强度

第一章 关于蜂窝结构的概述

1.1 蜂窝夹芯组件和部件的结构特性

由于对现代飞机性能的要求越来越高，因此，用胶接、焊接和钎焊把少数零件连接成整体并具有很高比强的结构得到更广泛的应用。采用带夹芯的夹层结构使这个问题易于解决。夹层结构是由两块面板及其中间的夹芯构成的，夹芯可以保证面板协调的工作和必要的结构刚性。

在夹层结构中采用的夹芯有：

- 用浸渍各种树脂的纸、玻璃布、和聚酰胺纸，以及铝合金、钛合金和不锈钢等材料制造的蜂窝夹芯；
- 波纹板状夹芯；
- “凹凸式”夹芯；
- 泡沫塑料及泡沫铝夹芯；
- 用浸渍树脂的玻璃布制成的封闭式外形夹芯。

不同夹芯的典型夹层结构件列于图 1.1 中。

蜂窝结构（见图 1.1, r）是夹层结构的一种，由面板和处于面板中间的蜂窝夹芯组成。夹芯使结构具有刚性、较高的稳定性和绝热、隔音及电绝缘等性能。

蜂窝结构的总稳定性比其面板本身的稳定性高许多倍。蜂

窝结构在压缩和剪切条件下的较高稳定性，使有可能设计出加大翼肋之间或隔框之间的距离也无需增加纵向桁条组的结构，而舵面、襟翼、副翼之类的夹层部件则根本不需要中间翼肋。由于蜂窝夹芯板件具有很高的稳定性，因而可采用约0.3—0.6毫米的小厚度受力蒙皮，这对减轻结构重量是非常重要的。

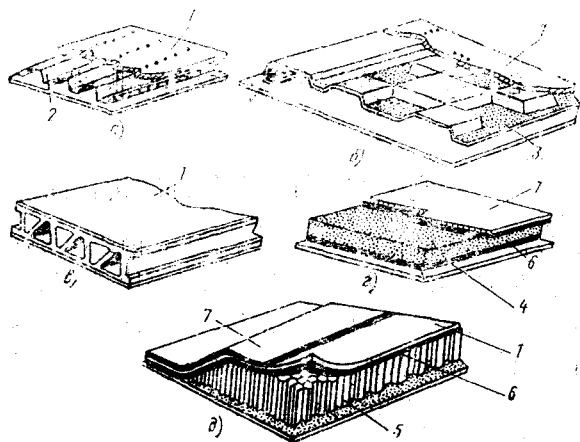


图1.1 不同夹芯的典型夹层结构件

a——波纹夹芯板件；b——凹凸式夹芯板件；c——封闭外形的夹芯板件；d——泡沫塑料夹芯板件；e——蜂窝夹芯板件。

1——面板；2——波纹夹芯；3——凹凸式夹芯；4——泡沫塑料夹芯；5——蜂窝夹芯；6——胶层；7——加强边

部件和组件中所应用的蜂窝夹芯结构分类（表1.1）如下：

——**第一类**——具有等高度的蜂窝夹芯板件，这类蜂窝板件具有不同的平面形状，有平的，单曲度和双曲度的，其中包括蜂窝板式蒙皮；

——**第二类**——具有变高度的蜂窝夹芯和带有复杂弯曲外

形的蜂窝夹芯的板件，包括象伺服补偿器、调整片、舵面、襟翼、减速板和阻流片等这类部件。

根据设计方案的不同，蜂窝板件可分成有封闭式骨架和非封闭式骨架，以及无骨架的几类板件。无骨架板件要依靠在蜂窝夹芯中局部加强的办法进行固定。

蜂窝结构与用长桁和翼肋加强的蒙皮结构相比，具有下述非常重要的优点：

1. 很大的比强（强度极限与重量之比）。这个优点对于不锈钢结构更为明显；

2. 受纵向压缩时具有较高的刚性和稳定性；

3. 较好的疲劳强度性能，特别是在较高的声震载荷区内；

4. 较光滑的表面；

5. 装配组件设计劳动量小；

6. 组成组件或部件的零件数量少；

7. 具有很高的绝热和隔音性能。

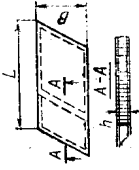
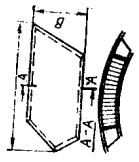
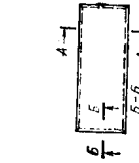
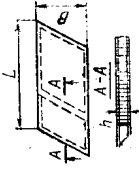
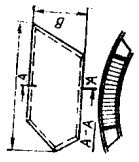
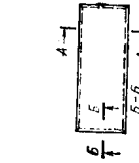
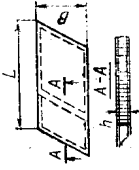
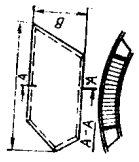
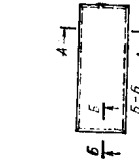
蜂窝夹芯根据所应用的材料不同可分为两类。

小密度的夹芯。用浸渍各种不同树脂的纸、棉布和玻璃布，以及铝合金制的夹芯均属此类。在这些结构中，采用铝板、玻璃钢和胶合板等做面板。

大密度的夹芯。不锈钢和钛合金制蜂窝夹芯属于这一类。这种蜂窝夹芯元件是焊接的，而面板与蜂窝夹芯间则可用钎焊或焊接连接。大密度夹芯适用于承受高应力和高温的结构中。

图 1.2 列出不同密度夹芯板件的强度和重量特性曲线。从曲线图上可以看出，强度和重量指标的相互关系，也标出了不同密度蜂窝夹芯板件的分布区域。如图所示，不锈钢制的夹层板件具有最高的强度和重量指标，玻璃布夹层板件最低，而铝合金夹层板件则处于中间位置。

表 1·1

蜂 窝 胶 接 板 件			
类别	等 高 度	变 件	度
亚类	平板件和单曲度板件	双曲度板件	平板件和单曲度板件
形式	平面图形简单	平面图形复杂	平面图形简单和复杂
组别	带密封式骨架	带非密封式骨架	无骨架
型	 外廊尺寸: $h \leq 15.0$ $L = 300 \sim 3500$ $B = 500 \sim 1500$	 外廊尺寸: $h = 40 \sim 6$ $L = 400 \sim 3000$ $B = 600 \sim 1200$	 外廊尺寸: $h = 15 \sim 100$ $L = 500 \sim 3500$ $B = 150 \sim 900$
	 外廊尺寸: $h = 4 \sim 6$ $L = 400 \sim 3000$ $B = 120 \sim 1300$ $h = 4 \sim 15$ $L = 700 \sim 1500$ $B = 150 \sim 700$	 外廊尺寸: $h = 4 \sim 6$ $L = 400 \sim 3000$ $B = 120 \sim 1300$ $h = 4 \sim 15$ $L = 700 \sim 1500$ $B = 150 \sim 700$	 外廊尺寸: $h = 8 \sim 200$ $L = 200 \sim 3500$ $B = 200 \sim 1000$
	 外廊尺寸: $h = 4 \sim 6$ $L = 400 \sim 3000$ $B = 120 \sim 1300$ $h = 4 \sim 15$ $L = 700 \sim 1500$ $B = 150 \sim 700$	 外廊尺寸: $h = 40 \sim 6$ $L = 400 \sim 3000$ $B = 600 \sim 1200$	 外廊尺寸: $h = 15 \sim 100$ $L = 500 \sim 3500$ $B = 150 \sim 900$
别	带密封式骨架	带非密封式骨架	无骨架

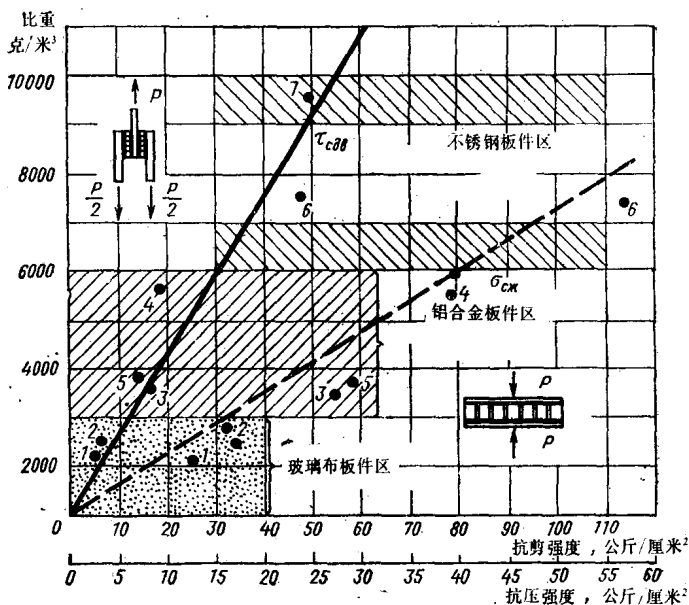


图1.2 夹层板件结构参数和重量的相互关系

1——玻璃胶布板面板，玻璃布蜂窝；2——玻璃胶布板面板，AMr2—H 蜂窝；3——Д16—T面板，厚0.3，A5T 蜂窝；4——Д19—T 面板，厚0.5；AMr2—H 蜂窝，厚0.03；5——Д19—T 面板，厚0.8，AMr2—H 蜂窝，厚0.05；6——CH—2面板，厚0.6，CH—2蜂窝，厚0.05；7——《应力蒙皮》公司的焊接板件

表 1.2 中列出在航空技术和其它国民经济部门所采用的蜂窝结构的比例关系。

近年来以碳塑料和硼塑料为基的复合材料作为结构材料得到推广。在蜂窝夹芯夹层板件中，这种复合材料用于制造面

板, 以及加强在强载荷区内结构的个别构件, 其中包括面板在骨架上的固定区域。这是为了提高疲劳强度。苏联工业中采用 KM2—1 做为制造夹层面板的复合材料。

表1.2

蜂窝夹芯材料	应 用 (%)		重量, 标准单 位	价值, 标准单 位
	航空 技术	其它国民经 济部门		
牛皮纸	20	80	1	2
棉 布	40	60	3	4
玻璃布	60	40	4	3
铝合金	85	15	2	1
钛合金	100	—	5	6
不锈钢	100	—	6	5

在常温下, 当密度为 1.45克/厘米^3 时, 这种材料的强度极限为 $70\sim 80\text{公斤/毫米}^2$, 弹性模数为 17000公斤/毫米^2 。这种材料的比刚度和单位疲劳强度都大大超过所有已知的材料。工作温度可达到 250°C 。蜂窝夹层板面板是用下述方法制成的: 把预先浸树脂的半成品, 于压力 $10\sim 30\text{公斤/厘米}^2$ 和温度 200°C 下, 压制不少于48小时。这种材料能进行各种机械加工和满意的胶合。

为加强强载荷区内的结构元件, 要采用 KMБ—1 硼 塑 料——以牌号 BH—200 硼纤维和 ЭП—11 环氧聚异氰酸脂粘合剂为基的聚合复合材料。在常温下, 当密度为 $1.90\sim 2.1\text{克/厘米}^3$ 时, 这种材料的抗弯强度极限为 $120\sim 150\text{公斤/毫米}^2$, 弹性模数为 $19000\sim 23000\text{公斤/毫米}^2$ 。这种材料按其比刚度优于已知结构玻璃钢3~5倍, 而优于钛和钢2~3倍。硼塑料的特点是在温度影响下可保持很高的物理机械性能, 在温度 200°C 下可长

时间工作达500小时。毛坯是用下述方法制造的：先进行缠绕，然后铺敷浸过胶的半成品，在压力10公斤/厘米²下及适当的温度规范（200℃，时间1~5小时，取决于厚度）下压制而成。这种材料能进行各种加工和满意的胶合。

美国北美飞机公司和航空喷气发动机通用公司共同研究供航宇技术用的复合材料。

根据美国空军材料试验室〔1〕所进行的工作，可以对用玻璃钢设计和制造机体的第一次认真试验作出鉴定，并根据这些工作计划制造北美飞机公司的 T—2 B 飞机外翼。

通用动力公司、伊利诺工学院和得克萨斯实验公司实现了用这种复合材料制造飞机水平尾翼实验翼盒的共同计划。此实验翼盒是通用动力公司的 F—111 飞机尾翼类似部件缩小比例的模型，并符合对其提出的所有要求。尾翼上、下面板是采用作为增强材料的硼纤维和环氧树脂基体制成的。面板层是用宽76毫米的连续浸胶条带一层层铺放的。每一层都要单独按样板铺，以保证纤维的相应方向和每层的尺寸。

用纤维增强的复合材料具有很高的弹性模数和很小的重量，在蜂窝夹层结构中使用是有效的，尤其是在失去稳定性的载荷下更为有效。根据通用动力公司的资料表明，铝合金面板用硼环氧材料面板代替，可保证水平尾翼每个翼面的重量降低79.5公斤/米。

使用这种复合材料的结构有效性可以提高，其原因如下：

——采用具有较高性能的树脂——强度极限为2100公斤/厘米²和弹性模数为 0.056×10^6 公斤/厘米²。具有这些性能的树脂可以成功地用于制造抗压强度达17600公斤/厘米²的复合材料；

——制造复合材料用的纤维具有很高的弹性模数；

——提高复合材料的抗剪强度——抗剪强度低常常是在应