

# 钛合金蜂窝整体机身壁板技术应用研究

## Engineering Application Research of Titanium Honeycomb Integral Fuselage Panel Technology

中航工业成都飞机设计研究所 杨海波 江少华 赵志远 岳喜山

**[摘要]** 对比分析了钛合金蜂窝及其基础性能,并对典型钛蜂窝夹层壁板结构的综合性能进行了研究;对钛合金蜂窝整体壁板的成型工艺和检测技术进行了介绍和总结。通过与传统的加筋组合壁板结构的工程应用对比,验证了钛蜂窝壁板结构在整体性能的明显优势。

**关键词:** 钛合金蜂窝 整体壁板 无损检测

**[ABSTRACT]** Titanium alloy honeycomb's basic performance data is compared with aluminium alloy honeycomb's. The structure strength of typical titanium honeycomb-core sandwich panel is studied. Forming and non-destructive testing technology for titanium honeycomb integral panel is presented. By comparing with traditional assembly panel in engineering application, the superiority of titanium honeycomb panel in integral performance is distinguished.

**Keywords:** Titanium alloy honeycomb Integral panel Non-destructive testing

蜂窝夹层壁板结构因具有比刚度、比强度高,整体化,降噪,隔热等性能优点,广泛应用于航空航天领域。传统的蜂窝夹层壁板结构较多地采用纸、铝合金以及复合材料作为蜂窝芯体和面板材料。近年来,钛合金蜂窝夹层结构的应用越来越广泛,与传统的蜂窝夹层结构相比,钛合金蜂窝壁板结构除了上述共同的优点之外,由于钛蜂窝芯的材料特点,具有更高的强度和刚度、更优良的耐热和隔热性能以及更好的抗腐蚀性和疲劳寿命。

本文研究了钛蜂窝及夹层结构的基础性能以及典型钛蜂窝夹层结构的工艺制造和检测技术,并结合实际工程应用对钛合金蜂窝侧壁板结构与传统的钛合金加筋组合侧壁板结构的整体性能进行了分析对比。

### 1 基础结构特性

钛合金蜂窝壁板结构以钛合金为基础材料,兼具了钛合金和蜂窝夹层结构的优点,可得到更加优良的综合性能,有效地减轻结构重量,提高结构效率。

### 1.1 蜂窝芯体性能

钛蜂窝是由钛合金箔材通过点焊加工而成的轻质芯材,箔材材料为 TC1 或 TC4,蜂窝芯格为正六边形或四边形,正六边形蜂窝芯体结构如图 1 所示。

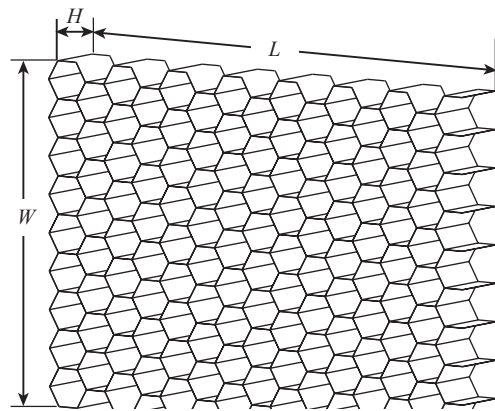


图 1 正六边形蜂窝芯体  
Fig.1 Hexagon honeycomb-core

铝蜂窝与钛蜂窝同为金属蜂窝,在性能和使用环境上具有相似之处和可比性。表 1 是两种规格(箔材厚度 × 蜂窝边长)相近的铝蜂窝和钛蜂窝的性能对比。从表中可以看出,钛蜂窝的密度约是铝蜂窝的 3 倍,而钛蜂窝的平压强度和模量却已接近是铝蜂窝的 9 倍,比强度和比刚度之比接近 3 倍。因此,钛蜂窝在同等强度和刚度条件下,重量可以设计得更轻。

### 1.2 夹层结构性能

工程应用中典型钛蜂窝夹层壁板结构是由 TC1 或 TC4 蜂窝芯体、钎料箔和 TC4 上下面板整体装配并真空钎焊而成,其结构装配示意图如图 2 所示。

上下面板主要承受面内载荷;蜂窝芯体主要起支撑作用,以提高结构面内稳定性,同时增加结构高度,提高上下面板的承载效率。表 2 列出了钛蜂窝夹层壁板结

表 1 铝蜂窝<sup>[1]</sup>和钛蜂窝性能对比

芯体材料	蜂窝规格 / (mm · mm)	密度 / (kg · m <sup>-3</sup> )	平压强度 / MPa	平压模量 / GPa	比强度 / (N · m · 10 <sup>4</sup> · kg <sup>-1</sup> )	比刚度 / (N · m · 10 <sup>9</sup> · kg <sup>-1</sup> )
铝合金	0.05 × 5	41	1.45	182	3.53	4.44
TC1	0.05 × 4.8	126	12.8	1618.9	10.16	12.85

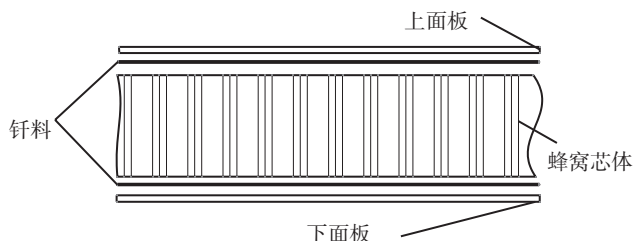


图2 钛合金蜂窝壁板结构装配示意图  
Fig.2 Titanium honeycomb panel assembly

表2 钛蜂窝夹层结构强度测试数据

试验内容	试样尺寸 / (mm·mm)	测试值 / MPa	失效方式
平拉强度	50 × 50	13.82	蜂窝芯破坏
平压缩	50 × 50	12.8	蜂窝芯压塌
侧压缩(L方向)	50 × 50	92.49	蜂窝芯破坏
侧压缩(W方向)	50 × 50	89.05	蜂窝芯破坏
3点弯曲	120 × 30	201	蜂窝芯S形变形失效
剪切强度(L方向)	60 × 20	2.68	蜂窝芯剪切失稳破坏
剪切强度(W方向)	60 × 20	2.81	蜂窝芯剪切失稳破坏

构强度试验件的性能数据,其中蜂窝芯材料为TC1,规格0.05mm×4.8mm,芯体高度为15mm;内面板厚度为0.6mm,外面板为0.8mm,材料均为TC4。图3和图4分别为钛蜂窝夹层结构平压缩和3点弯曲力学性能试验件,可明显看出其结构失效方式。



图3 平压缩试验件  
Fig.3 Compression test specimen

试验设备为Z100电子万能材料试验机;环境温度室温。

## 2 整体成形和无损检测技术

### 2.1 整体钎焊成形

钛蜂窝整体壁板结构工程应用的主要问题之一是



图4 3点弯曲试验  
Fig.4 Three-point bending test

整体钎焊成形技术,包括钎料的选择、工艺装配和钎焊过程的控制。

#### (1) 钎料。

适用于钛合金钎焊的钎料主要有银基钎料、铝基钎料及钛基钎料。它们的各自的特点如表3所示。结合使用环境进行分析和优化,确定选用耐腐蚀性、耐热性更好,高温强度更高的钛基钎料,即Ti-Zr-Cu-Ni系钎料<sup>[2]</sup>。

表3 不同钎料的特点

钎料类型	特点
银基钎料	熔点适中、焊缝塑性好,接头高温强度低、耐腐蚀性差
铝基钎料	成本低、熔点低、钎料流动性好,接头强度低、脆性大
钛基钎料	接头高温强度高、耐腐蚀、耐高温,成本较高

#### (2) 工艺装配。

钛合金蜂窝和蒙皮的刚度都较高,这也为工艺装配的设计带来了难度。钛蜂窝壁板整体钎焊之前,需按图2的形式将蜂窝芯和上下面板进行装配,两层钎料箔紧贴于蜂窝芯体的内外表面,然后用夹具将其固定,控制蜂窝芯与面板间的装配间隙小于0.1mm。

为保证在整个钎焊过程中,蜂窝芯和面板之间的间隙始终满足要求,需在内蒙皮外表面施加均匀的压力,且该压力不能过大,以免在高温钎焊的环境中将蜂窝压塌,另外需保证施压物的材料在钎焊温度下不与钛合金蒙皮在界面发生扩散反应。通过分析和试验,采用在内蒙皮外表面上放置均布钢块的方法来产生适合的均布压力,压强值控制在0.003MPa左右,刚度较大的局部区域适度增大;另外,需在钛合金蒙皮表面涂上阻焊剂,以阻止钢块与钛合金蒙皮在高温环境中发生材料扩散。

#### (3) 钎焊控制。

钎焊是一个精细的工艺控制过程,钛蜂窝整体壁板产品的品质很大程度上取决于各种钎焊工艺影响因子

是否得到有效的控制,包括钎焊的温度、时间以及环境的真空度等。

首先,钎焊前需对蜂窝芯体和面板焊接面进行溶剂清洗,并酸洗去除氧化膜<sup>[3]</sup>。然后将装配好的钛蜂窝壁板结构连同夹具放入真空钎焊炉中进行钎焊,钎焊过程中真空度要求不低于  $4 \times 10^{-3}$  Pa。钎焊的温度主要由母材相变温度和钎料熔点温度决定。钎焊温度必须低于 TC4 板材的相变点温度 955℃,且要达到或略高于钎料的熔点温度。经过钎焊工艺试验,最后优化出的最佳钎焊工艺为 875℃ /4h。

### 2.2 无损检测技术

钛蜂窝整体壁板结构在制造和使用产生的内部缺陷形式主要有蜂窝和蒙皮未焊合、虚焊、脱焊,以及蜂窝压塌等,这些缺陷的检查需使用无损检测方式进行检测定位。工程应用中主要用到 3 种检测技术方法:超声波穿透法<sup>[4]</sup>、反射法和 X 射线检测法。超声波穿透法用于检测蜂窝和内外蒙皮焊接缺陷的尺寸、形状,反射法确定焊接缺陷的位置(焊接缺陷位于蜂窝壁板哪一侧);X 射线用于检测和确定蜂窝结构损坏的形态、尺寸和位置。图 5 为超声波穿透法检测的蜂窝和蒙皮局部未焊合的图像,图 6 为 X 射线检测的蜂窝局部塌陷变形的图像。

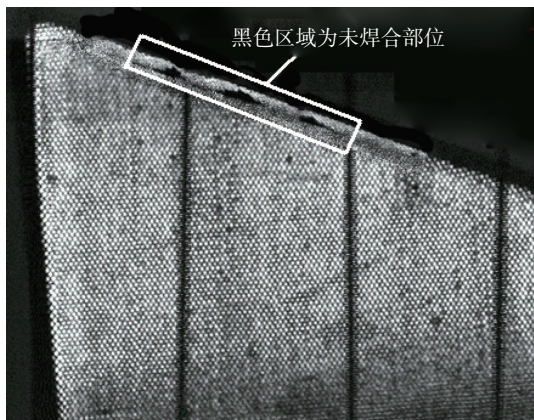


图5 蜂窝和内蒙皮局部未焊合  
Fig.5 Porous areas of brazed panel

## 3 工程应用及对比分析

### 3.1 工程应用结构特征

某飞机侧壁板结构外形面较为平整,处于高温热影响区,适合采用高效、隔热的钛合金蜂窝整体壁板结构。整个壁板跨度较大,最大尺寸为 1800mm × 900mm,且气动外形的局部曲率变化较大,给工艺成型及检测带来了较大难度。

蜂窝壁板内外蒙皮材料为 TC4; 两层蒙皮之间为两块蜂窝芯体,材料为 TC1,最大的蜂窝芯体的尺寸为

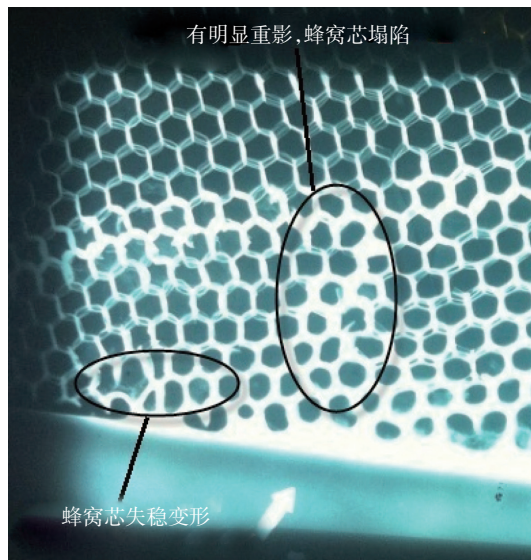


图6 蜂窝局部塌陷变形  
Fig.6 Deformation of honeycomb-core

900mm × 600mm,芯格的规格如表 1 中 TC1 蜂窝规格所示;四周连接区为夹层板,材料为 TC4,用于加强蜂窝斜角过渡区以及调整连接区的厚度。钛蜂窝侧壁板斜角区的示意图如图 7 所示。

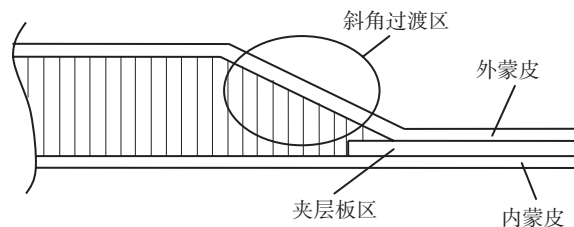


图7 钛蜂窝侧壁板斜角过渡区  
Fig.7 Titanium honeycomb panel transition area

### 3.2 结构要素对比

在同样的设计条件下,与传统的加筋组合壁板(如图 8 所示)对比,钛蜂窝整体壁板在结构整体性、结构效率上都有大幅提升。从表 4 可以看出,钛蜂窝整体壁板的零件数只有传统加筋壁板结构的 1/3 多一点,重量也减少了超过 1/4,由于采用了整体钎焊连接,机械连接件

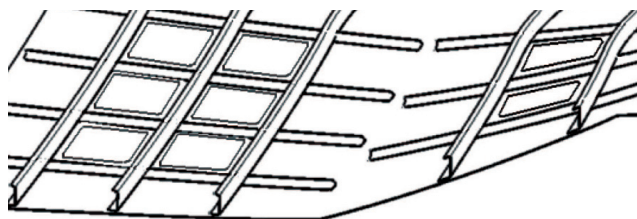


图8 传统加筋壁板布局结构  
Fig.8 Traditional assembly panel configuration

(下转第 133 页)

性、更高疲劳性能要求。

**参考文献**

[1] 王金友,葛志明. 航空用钛合金. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.

[2] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册. 北京: 中国标准出版社, 2002.

[3] 张树启. 紧固件用高强钛合金的发展. 钛工业进展, 1998(5): 1-3.

[4] 张庆玲,王庆如,李兴无. 航空用钛合金紧固件选材分析. 材料工程, 2007(1): 11-18.

[5] 赵庆云,徐锋. 航空紧固件用钛合金的研究进展. 中国有色金属学报, 2010, 20( 专辑 1): 1021-1023.

[6] 倪沛彤,韩明臣,张英明,等. 宇航飞行器紧固件用钛合金的发展. 钛工业进展, 2012, 29(3): 6-10.

[7] 张全纯. 钛合金紧固件的选材探讨. 航空工艺技术, 1991(4): 18-21.

[8] 611 所标准组. TB2-1 钛合金铆钉的研制及应用.

[9] 一七二厂钛铆课题组. 钛合金铆钉在飞机上的应用.

[10] 刘风雷. 我国航空钛合金紧固件的发展. 航空制造技术, 2000(6): 39-55.

[11] 毛进勤. 我国应积极发展高品质钛合金紧固件. 世界有色金属, 2008(4): 64-68.

[12] 宋敖登. 探讨我国航空标准件的发展. 航空工程与维修, 1999 (4):12-13.

[13] GJB120-1986, 钛合金铆钉 [S].

[14] GJB856-90, 抗拉型钛合金环槽, 铆钉规范 [S].

[15] GJB857.1-90, 100° 沉头抗拉型钛合金环槽铆钉 [S].

[16] 汪建林. 高强度  $\beta$  钛合金的发展和应. 上海钢研, 2001(2): 25-30.

[17] Zorn G, Lesman A, Gotman I. Oxide formation on low modulus Ti45Nb alloy by anodic versus thermal oxidation. Surface & Coatings Technology, 2006 (201): 612-618.

[18] Godley R, Starosvetsky D, Gotman I. Corrosion behavior of a low modulus  $\beta$ -Ti-45%Nb alloy for use in medical implants. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 2006 (17): 63-67.

[19] Feng X J, Macac J M, Schmuki P. Flexible self-organization of two size-scales oxide annotates on Ti45Nb alloy. Electrochemistry Communications, 2007(9): 2403-2407.

[20] 商国强,王新南,唐斌. 紧固件用 Ti-45Nb 合金丝材的性能评价. 中国有色金属学报, 2010, 20( 专辑 1): 70-74.

[21] 周芸,王超. 钛合金紧固件生产技术. 钛工业进展, 2001(1): 12-15.

[22] 赵庆云,刘风雷,刘华东. 世界先进航空紧固件进展. 航空制造技术, 2009(3): 54-56.

[23] 张源,张爱荔,李惠娟. TC4 钛合金的表面氧化及其对疲劳性能的影响. 钛工业进展, 2010, 27(1): 25-27.

[24] 陕西省有色金属工业管理局. 陕西省有色金属工业科技志. 西安: 陕西科学技术出版社, 1991.

[25] 张鹏,赖运金,王永哲,等. TC4 紧固件的疲劳断口. 中国有色金属学报, 2010, 20( 专辑 1): 826-829.

[26] 李兴无,沙爱学,苏生明,等. 冷变形强化钛合金紧固件及其应用前景. 第十二届中国有色金属学会材料科学与合金加工学术

讨论会文集, 2007:70-73.

[27] 杨洋,董利民,关少轩,等. 冷锻和热锻对 TC16 合金组织和性能的影响. 中国有色金属学报, 2010, 20( 专辑 1): 108-112.

[28] 曲璇中,殷小健,郭向洪. 新型航天天标准紧固件. 航天标准化, 2003(5): 15-18.

[29] GJB2219-94, 紧固件用钛及钛合金棒(线)材规范 [S].

[30] 何春艳,叶红川,曲恒磊,等. 热处理制度对 TB3 钛合金组织及性能的影响. 热加工工艺, 2011(20): 181-185.

[31] HB6732-93, 航空紧固件用 TB3 钛合金棒(线)材 [S].

[32] Grauman J S. Corrosion Behavior of Timetal 21S for Non-aerospace Applications. Titanium' 92: Science and Technology, TMS, 1993, 2737-2742.

[33] 彭益群,周光爵,于启山. 新一代  $\beta$  钛合金 -  $\beta$  21s 合金. 稀有金属, 1994(3): 187-189.

[34] 朱知寿,钟鸣,储俊鹏,等.  $\beta$  21S 钛合金薄板的热处理工艺和冷成形性能研究. 稀有金属材料与工程, 2000(1): 50-52.

[35] Boyer R R. Aerospace Applications of Beta Titanium Alloys. JOM, 1994, 7: 20-23.

[36] GB/T3620.1-1607, 钛及钛合金牌号和化学成分 [S].

(责编 深蓝)

(上接第 128 页)

表 4 钛蜂窝整体壁板与传统加筋结构要素对比

结构要素	传统加筋壁板	钛蜂窝整体壁板	要素减少	减少百分比 /%
零件数量	13	5	8	61.5
结构重量 /kg	9.14	6.78	2.36	25.8
机械连接件数量	560	170	390	69.6

数量减少了接近 70%,从而大大减少了因连接装配开孔对结构产生的削弱和初始缺陷,并有效地提高了蒙皮的表面质量。

**4 结论**

性能分析表明,钛合金蜂窝与铝合金蜂窝相比,有更高的比强度、比刚度和耐热性,能有效提高夹层壁板结构的整体刚度、稳定性和隔热性;而在实际工程应用中,钛蜂窝整体壁板与传统加筋壁板相比,在结构整体性和重量上更具有明显的优势。

**参考文献**

[1] 潘玲英. 共固化复合材料 / 铝蜂窝夹层结构性能. 宇航材料工艺, 2012(4): 56.

[2] 岳喜山,欧阳小龙,侯金宝,等. 钛合金蜂窝壁板结构钎焊工艺. 航空制造技术, 2009(10): 96-97.

[3] Pressly H B. Brazing Titanium Structures. Technical Communications, 1977: 7.

[4] Drury J C. Ultrasonic flaw detection for technicians. 3rd ed. Wales UK: Silverwing Limited, 2004: 165-210.

(责编 良辰)