

# 金属基复合材料在美国航天飞机上的应用(上)

## —美国航天飞机上的硼/铝管构件

孙长义 于 琨

### 摘 要

本文根据国外的文献报道,介绍并分析了硼/铝管材在美国航天飞机上的应用情况。本文分上、下两部分。上部主要介绍了硼/铝管构件的使用部位、制造工艺与性能试验;下部着重从性能水平、工艺水平、使用经验和价格问题几个方面论述了选用硼/铝的优越性。

在发展现代高技术项目中,纤维增强金属基复合材料是重要的内容之一。由于其高比强度与比刚度,尤其在航天与航空领域里,具有举足轻重的作用。到目前为止,硼/铝是性能优异,制作工艺技术发展最成熟的一种金属基复合材料,国际上(主要是美国)已从实验室研究阶段进入实际工程试验应用时期,并已在航空与航天的各种飞行器上进行了广泛的应用试验。而最成功的实际应用,则是美国在航天飞机机身上大量使用硼/铝管构件。这些复合材料支柱,不仅完全满足性能要求,并且大大减轻了航天飞机机身结构的重量。

本文(上、下)在介绍美国航天飞机上应用的硼/铝管构件的同时,也试图从几个方面,着重讨论在当前条件下,为什么硼/铝是在航天飞机上唯一被选用的纤维增强金属基复合材料。

### 航天飞机上的硼/铝管构件

美国在航天飞机机身上采用硼纤维增强6061铝合金制成的带Ti-6Al-4V合金端环与端接头的硼/铝管,如主要骨架和肋条桁架支柱、骨架稳定支架、制动器支撑柱等。在首批三架航天飞机上,每架共安装了243根这样的硼/铝管构件。全部硼/铝管的重量为150kg<sup>[1]</sup>。这些复合材料管桁架构件,达到航天飞机实际飞行的全部性能要求,比最初铝合金挤压件的设想,在中机身结构部分,可节重145kg<sup>[1,2]</sup>,相当于重量降低44%<sup>[2]</sup>。另一个优点是节省空间,改善了飞行器内部通道。

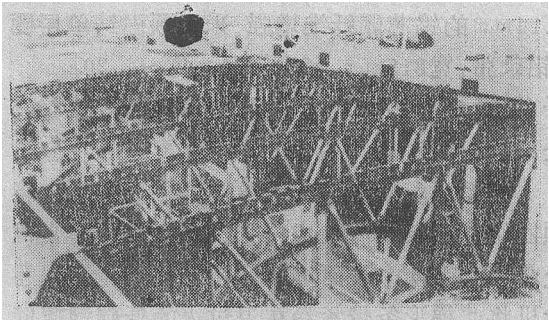


图1 美国航天飞机中机身硼/铝管构件的配置

如图1所示,硼/铝管桁架构件是通过焊在管端的钛合金接头,用螺栓与中机身骨架连接在一起,形成一个整体的受力框架。钛合金端接头的热传导系数仅为铝的十分之一,有助于防止热流通过结构传入仪器和载荷机舱,从降低热防护需要来说,这也提供了另外的重量节省。

随使用部位及受载状况的不同,在美国航天飞机上应用的不同长度、厚度和直径的硼/铝管,共有89种。其主要的类别可见表1<sup>[2]</sup>。

表1 美国航天飞机上使用的硼/铝管的主要种类

| 管子直径<br>mm | 长 度<br>mm | 厚 度<br>mm | 设计最大载荷<br>kN | 重 量<br>kg |
|------------|-----------|-----------|--------------|-----------|
| 92         | 2280      | 1.4       | 155          | 3.3       |
| 67         | 1330      | 1.0       | 105          | 1.3       |
| 54         | 1850      | 0.7       | 10           | 0.75      |
| 67         | 880       | 2.5       | 235          | 2.5       |
| 25         | 600       | 0.7       | 15           | 0.15      |

其中最大的管长2280 mm, 直径92 mm, 重量达3.3 kg, 最小的管长600 mm, 直径25 mm, 重0.15 kg。

## 硼/铝管构件的制造

美国用热等静压方法<sup>[2,3,4]</sup>, 制得了质量可靠的带钛合金端接头的硼/铝管构件, 其工艺细述如下:

该管材使用6061-F 铝合金基体, 以直径0.14 mm的钨芯硼纤维增强。采用预固结单层硼/铝条带。宽815 mm, 长3 m, 厚0.17~0.20 mm。纤维数 $54 \pm 1/cm$ , 纤维体积百分比 $46.5 \pm 2.5\%$ 。

如图2所示, 按纤维单向增强的要求, 将预固结单层条带剪裁成梯形。在专用的磨带机上将该条带两个表面擦净并使之粗糙化。用卷片机将此梯形条带紧卷在退过火的低碳钢薄壁

心轴套上。卷紧后的条带管两端呈螺旋形的斜面。两个Ti-6Al-4V钛合金端环的内表面, 机加工成相应斜面, 与卷片后出现的斜面相配合。对于拉伸条件下使用的管, 斜面的搭接部位长度为 $40t$  ( $t$ =管材壁厚), 也即对于每一硼/铝层, 约有7 mm的结合宽度。对主要在压缩载荷下工作的管构件, 此搭接部位长度可适当减小。为了保证搭接斜面的全部接触, 钛合金端环的接触面加长6 mm。另外, 为防止以后端环与端接头焊接时硼/铝过热, 又将钛合金端环长出搭接部位19 mm。

将带有硼/铝卷管及钛合金端环的低碳钢心轴套, 用插管机插入钢制的厚壁外套中。该外套的内径即成品管的外径尺寸。内外套两端焊上钢环, 将整个组件套两端封严, 在外套上焊有抽气管。对组件进行氦泄漏试验。此后, 将组件加热, 并通过抽气管抽真空, 以去除任何可能影响热压扩散结合的污染; 并在真空下封

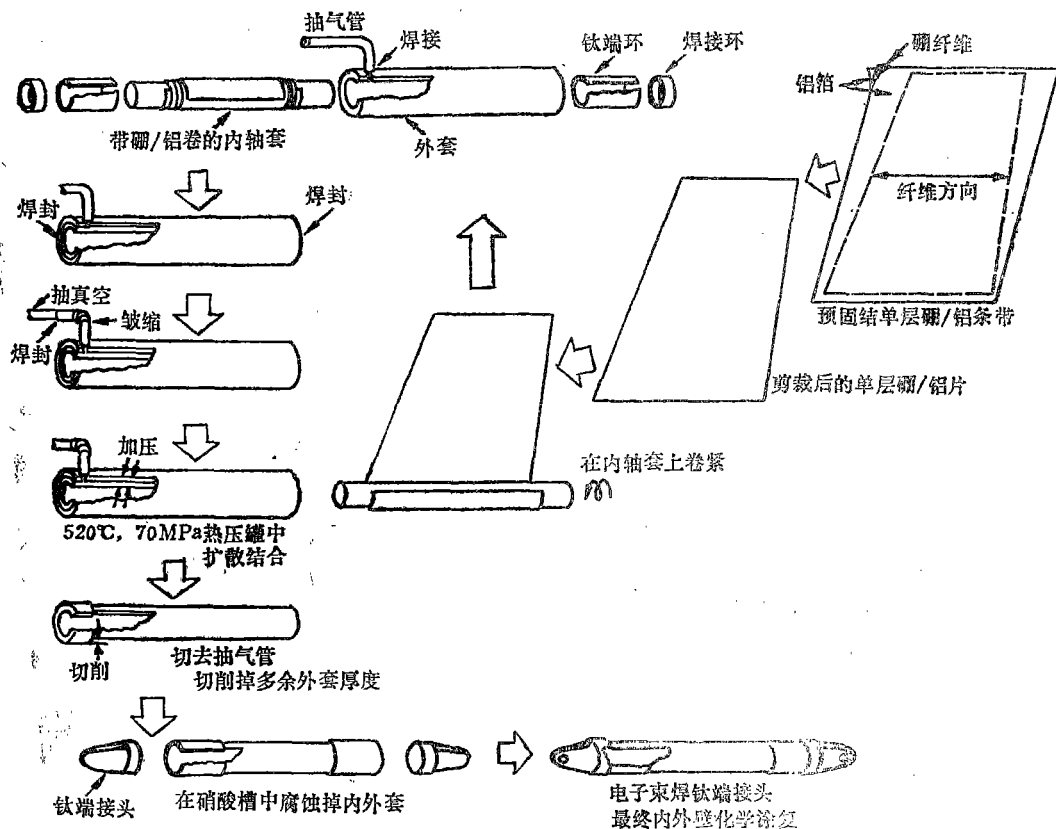


图2 热等静压法制造带钛合金端接头的硼/铝管的工艺流程

严抽气管, 便得到内腔呈真空的组合件。

组件放入等静压机的热压罐中进行热压扩散结合。热压罐长3.7m, 内径0.2m。液氮为压力源。在温度540℃、压力70MPa下进行热压。在热压过程中, 延性的薄壁内套屈服、延展, 将所施加的压力传递到紧裹在内套轴上的硼/铝单层条带卷及钛端环上, 使硼/铝复合材料扩散结合, 同时将硼/铝与钛合金端环固结在一起。

组件热压后, 外套经过机加工到与内套大致相同的厚度, 接着将组件浸入硝酸槽中腐蚀掉内外套, 得到带钛合金端环的硼/铝管。再将另外加工好的钛合金端接头, 同电子束焊到硼/铝管的钛合金端环上。至此, 带钛合金端接头的硼/铝管已全部制作完毕, 最终的工序是对管子的内外壁进行化学涂复环氧类涂料。

硼/铝管与钛合金端环的连接部位, 用超声法检测固结的缺陷。

机加工的钛合金端接头, 经色渗检测。该接头与钛端环的电子束焊接部位, 用射线照相

检查。

几种制成的硼/铝管构件见图3。

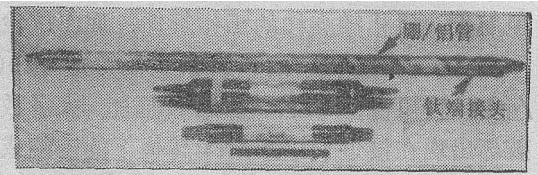


图3 热等静压法制造的带钛合金端接头的硼/铝管构件

### 硼铝管构件的性能

为了论证硼/铝管构件在航天飞机上实际应用的优越性, 并为批量生产奠定基础, 曾制造了100多根硼/铝管进行可行性试验。先后进行局部屈曲与断裂、管柱中间部位屈曲、静态连接强度(拉伸与压缩)、加载下热循环、室温疲劳、缺口的影响及抗盐雾腐蚀等试验。试验取得成功, 也为设计数据的最终确定提供了可靠的依据。

单向增强、纤维体积含量50%的热压扩散结合硼/铝板材, 其典型性能见表2。

表2 硼/铝板材典型性能

| 性 能                        |          | 纵 向                       | 横 向                     |
|----------------------------|----------|---------------------------|-------------------------|
| 拉伸强度, MPa                  |          | 1490                      | 140                     |
| 拉伸模量, GPa                  |          | 215                       | 140                     |
| 泊 松 比                      |          | 0.23                      | 0.13                    |
| 压缩强度, MPa                  |          | 1725                      | 205                     |
| 压缩模量, GPa                  |          | 220                       | 140                     |
| 剪切强度, MPa                  |          | 160                       | —                       |
| 剪切模量, GPa                  |          | 40                        | —                       |
| 支承强度(4D), MPa              |          | 825                       |                         |
| 疲劳强度                       |          | 1035MPa 10 <sup>7</sup> 周 | 40MPa 10 <sup>7</sup> 周 |
| 370℃1105MPa时的蠕变            |          | 100小时, 平均总变形0.06%         |                         |
| 热膨胀系数, 10 <sup>-6</sup> /℃ | -195~25℃ | 4.0                       | 16.2                    |
|                            | 25~370℃  | 6.0                       | 21.3                    |
| 比热容, J/g·K                 |          | 1                         |                         |
| 密 度, g/cm <sup>3</sup>     |          | 2.6                       |                         |

## 屈曲试验

对于热等静压工艺制得的硼/铝管,为了模拟航天飞机桁架支柱的工作条件,屈曲试验是一项重要内容。硼/铝部分细长比为 $12\sim 26(L/\gamma)$ 的较短管,不易产生局部屈曲。大多数的破坏出现在接近于1670 MPa高值下的压缩或在管子直径与壁厚比 $D/t$ 过高时。试验表明,此比值的上限约为96。对照表2,从试验得到的数据来看,用热等静压法得到的硼/铝复合材料,其力学性能基本上是正常的。

## 强度试验

鉴于纤维增强金属基复合材料自身的特点,其构件与其他元器件之间的连接,以及通过连接而将载荷从复合材料向其他金属材料的传递,始终是一个十分棘手、关系器件设计成败的关键。在上述制管过程中,将硼/铝与钛合金利用斜面搭接,有效地增大纤维与金属结合面,使有可能再通过焊接或其他手段,在管端安置一连接头的工艺设计,这在金属基复合材料用作管状元件方面,是一个重要的技术突破。因此,硼/铝与钛合金之间连接的好坏,就受到极大的关注。

据强度试验结果,将桁架支柱构件连接部位拉伸与压缩的最大设计强度都定为530 MPa。如对直径25 mm(4层)、长300 mm的带钛端环的硼/铝管进行的静态连接强度试验结果表明,拉伸强度最小740 MPa,最大970 MPa;压缩时,最小1005 MPa,最大1360 MPa。即使考虑到疲劳与温度的影响,上述试验结果也证明,扩散结合的连接是成功的。

## 疲劳试验

结构设计中对管构件所限定的设计载荷为380 MPa。在进行疲劳试验之前,全部管构件要经受120%设计载荷的静态拉伸与压缩试验。疲劳试验包括:在室温及设计载荷下, $R=-1$ , (全拉伸与压缩)2000周;在最大设计载荷下, $R=-1$ ,2000周;在 $R=-1$ 及设计载荷下2000周,同时经受 $175\sim -195^{\circ}\text{C}$ 的热循环500次。

经受上述疲劳试验的管构件,都没有出现

明显的破坏和失败。

## 腐蚀试验

用环氧涂料对管构件的内外表面进行化学涂复,随后经受500小时的盐雾处理,几乎看不到管壁表面有腐蚀的痕迹。盐雾处理后的管构件,进行破坏性试验,其应力水平明显高于设计的最大值。结果表明,经上述工艺处理的硼/铝管构件,有良好的防蚀性能。

## 缺口效应

在生产、装配、使用的过程中,由于操作上的偶然因素,可能会对管壁造成某种程度的损伤。为模拟这种情况,在试验时,将试验管的一边,人为地锯割成一定深度的槽口,造成相当数量的纤维毁坏。在随后的拉伸与压缩试验时发现,所有管子都在静态最大管壁强度之上破坏。其他类似的带槽口管,在设计载荷下,经受1000次疲劳周期,然后静态机械试验,在接近最大载荷时出现破坏。管子强度有所降低的事实表明,不允许管壁有大的平面槽口型的破损。

对最后一组管子的外表面进行过度侵蚀,在很宽的圆周带上,使纤维完全裸露。在静态和疲劳试验中,这些管子显示了很高的强度。这表明纤维完好。仅仅是铝表面的损伤,并不影响复合管的力学性能,类似的损伤是可以容忍的。当然为防止进一步的损坏,裸露的纤维应该用涂料加以保护。

上述一系列的可行性试验结果,积累了充分的数据及分析资料,为结构设计标准的进一步制订,为设计、生产、使用带钛合金端接头硼/铝管构件的可靠性,提供了重要的依据。

在航天飞机上装配使用的硼/铝管构件最终选定的设计和试验分析数据,如表3所示。设计的管构件工作温度为 $-120\sim 120^{\circ}\text{C}$ 。

通过上面的介绍可以看到,美国用热等静压方法制造带钛合金端接头的硼/铝管构件,取得了实质性的成功,并卓有成效地在航天飞机上大量应用。这一方面是由于硼/铝复合材料本身具有优良的综合性能,另一方面在构件设计

表 3 硼/铝管构件的设计与分析 试验数据

| 硼/铝复合材料                         |      |     | Ti-6Al-4V            |        |
|---------------------------------|------|-----|----------------------|--------|
| 纵向拉伸模量 $E_{11}$                 | 200  | GPa | 电子束焊部位应力, 拉伸和压缩      | 310MPa |
| 横向拉伸模量 $E_{22}$                 | 120  | GPa | 最大强度 $F_{tu}=F_{cu}$ |        |
| 剪 切 模 量 $G$                     | 45   | GPa | 退火材料, 拉伸和压缩          | 780MPa |
| 泊 松 比 $\mu$                     | 0.3  |     | 最大强度 $F_{tu}=F_{cu}$ |        |
| 管壁应力, 拉伸和压缩最大强度 $F_{tu}=F_{cu}$ | 1020 | MPa | 弹性模量 $E$             | 105GPa |
| 连接应力, 拉伸和压缩最大强度 $F_{tu}=F_{cu}$ | 530  | MPa |                      |        |
| 管子直径与壁厚的比 $D/t$                 | 80   | 最大  |                      |        |
| 管子细长比 $L/\gamma$                | 100  | 最大  |                      |        |

及制作工艺技术上, 积累了较丰富的经验, 并取得重要的突破, 再则在成本上也是合算的。关于这些问题, 我们将在本文(下)中加以讨论。

### 参 考 文 献

[1] Lewis, C.F., Materials Engineering,

(1986) 5, P33.

[2] Weisinger, M.D., Metal Progress, Vol. 113 (1978) No. 5, P60.

[3] Weisinger, M.D., Society of Manufacturing Engineers, (1975) EM75-116.

[4] Renton, W.J., Hybrid and Select Metal Matrix Composites, A state of-the-Art Review, 1977.

✕

✕

✕

✕

✕

### 新型腐蚀抑制剂——含锌涂料

法国Ets DERIVERY公司研制出一种新型腐蚀抑制剂——含锌涂料。它是一种含锌底漆。含锌底漆的防腐作用机理是以锌的羟基与 $CO_2$ 起反应生成碳酸盐和羟基碳酸盐为条件的。通常, 含锌的底漆具有许多严重缺点: 对金属的附着力低, 涂层中的锌很快被浸析, 在空气中起泡沫, 被涂金属的可焊性不理想。

新型涂料克服了上述缺点。它的组分中除含有锌粉外, 还加入了导电的铁磷化合物, 一般由 $Fe_2P$ 和 $FeP$ 与 $SiO_2$ 构成。X射线分析表明, 该涂料中加入了 $Fe$  (61~70%)、 $P$  (18~24%)、 $Si$  (2.5~4%)、 $Mn$  (23~5%)。  $Fe_2P$  是灰色耐热的坚硬物质, 密度为 $6.53g/cm^3$ , 熔点为 $1320^\circ C$ 。  $Fe_2P$  磨碎时得到大小不均、形状各异的颗粒。生产有色底漆时, 颗粒大约为 $6.5$ 微米的 $Fe_2P$ 在球磨机内与锌粉研磨24小时, 最后得到由多组分颗粒构成的色粉, 核心物质是导电的 $Fe_2P$ 和锌粉。

涂该含锌底漆的金属腐蚀试验结果如下:

| $Zn : Fe_2P$ | 锌的溶解量, % | 表面腐蚀损耗程度, % |
|--------------|----------|-------------|
| 5 : 95       | 56.3     | 100         |
| 10 : 90      | 27.9     | 95          |
| 15 : 85      | 18.4     | 65          |
| 20 : 80      | 10.1     | 25          |
| 25 : 75      | 8.7      | 0           |
| 35 : 65      | 17.3     | 0           |
| 50 : 50      | 35.6     | 10          |
| 65 : 35      | 45.3     | 25          |

在钢板上涂敷厚度为25微米的涂层, 干燥后放置7昼夜, 然后在盐雾中保持250小时, 采用在酸中溶解涂层的方法, 测定残存锌的数量。从所得结果可以看出, 在着色涂料中加入含锌量为20%的色素是合适的。 $Fe_2P$ 本身一般并不具有抑制作用, 但在 $Zn-Fe_2P$ 的混合物中, 它作为阴极起着积极作用。

(邢致信摘译)