

# 金属基复合材料在美国航天飞机上的应用(下)

## ——为什么美国航天飞机选用硼/铝复合材料

于 琨 孙长义

### 摘 要

本文根据国外的文献报道与动态,介绍并分析了硼/铝管材在现有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、使用经验和价格等几个方面论述了选用硼/铝的优越性。

硼/铝复合材料是美国航天飞机目前唯一使用的金属基复合材料。本文(上)(见本刊今年第5期)对硼/铝在航天飞机上的使用部位、制造工艺与性能已作了详细介绍。美国航天飞机之所以选用硼/铝作为中机身桁架支柱,主要是因为硼/铝在性能水平上、工艺成熟程度和使用经验上均超过现有的其他金属基复合材料,如碳化硅/铝、碳/铝、氧化铝/铝等,而在成本上也不比这些材料贵。本文将就这几方面进行论述。

### 性能水平分析

由于铝合金在飞行器上的广泛应用,铝基

复合材料便成为目前发展最快的金属基复合材料,它给航空航天飞行器带来巨大的减重潜力。铝基复合材料的品种取决于可能使用的纤维。目前高性能实用型的连续增强纤维除硼纤维外,还有CVD(化学气相沉积)碳化硅、纺丝碳化硅、碳(包括石墨)、FP氧化铝、住友氧化铝等纤维。其性能见表1。由表1可见,硼纤维兼有极高的强度与模量,居各纤维之首,而比重较低(比铝还轻),仅大于碳纤维。与硼纤维性能相当的有CVD碳化硅纤维,但比重较大。碳纤维一般分高强型与高模型两种,难以同时兼备高强度与高模量。新发展的纺丝碳化硅纤维强度偏低,而模量只有硼纤维的一半。

表 1 几种主要连续纤维的典型性能<sup>①</sup>

种 类	规 格	拉伸强度, MPa	拉伸模量, GPa	比 重	生 产 厂
硼纤维(B <sub>4</sub> C涂复)	140μm单丝	3550	400	2.5	AVCO(美)
CVD碳化硅纤维	100~140μm单丝	3500	420	3.0~3.4 <sup>②</sup>	AVCO(美)
纺丝碳化硅纤维	12μm500根纤维束	3000	200	2.55	SIGMA(西德)
碳纤维	7μm3000或10000根纤维束	2800	250	1.7	碳公司(日)
		2100	350	1.9	
FP氧化铝纤维	20μm210根纤维束	1380	379	3.9	DU PONT(美)
住友氧化铝纤维	17μm1000根纤维束	1500	200	3.25	住友(日)

①数据主要取自各生产厂产品说明,代表当前工业生产水平。

②分别为碳芯和钨芯纤维比重。

硼纤维的高性能为硼/铝复合材料的优越性能奠定了基础。

表 2 列举了上述纤维增强的铝基复合材料的典型性能。由于复合材料的性能在很大程度上取决于增强纤维, 因此表 2 中的材料性能大体上保持了纤维性能的格局。需要指出的是象硼和CVD碳化硅这样的粗纤维在发挥性能方面较为有利。束状细纤维(如纺丝碳化硅和碳纤维)由于与金属的复合工艺较为困难, 一般只能做到40%以下的纤维体积百分比, 而且界

面反应问题比较突出, 影响性能。粗纤维复合材料的纤维体积比一般均可达到50%, 因而具有更高的性能水平。再则, 粗纤维直径远大于细纤维, 抗弯曲性好, 因此粗纤维复合材料的压缩强度比细纤维复合材料高。这就使硼/铝复合材料在性能上显出更大的优势。为了更形象地显示各种材料性能水平和比重的影响, 按有关数据绘制成图 1。由图可见, 在金属基复合材料中硼/铝的比强度与比模量最高。有这样高的起始强度, 它的疲劳极限与高温强度也比其

表 2 几种主要的连续纤维单向增强铝基复合材料的典型性能 [1~6]

种 类	纤维 体 积 比 %	拉伸强度 MPa	拉伸模量 GPa	比 重	比 强 度 MPa	比 模 量 GPa
B/Al	50	1200~1500	200~220	2.6	462~577	76.9~84.6
CVD SiC/Al	50	1300~1500	210~230	2.9	448~517	72.4~79.3
纺丝SiC/Al	35	700~900	95~110	2.6	269~346	36.5~42.3
C/Al	30~35	500~800	100~150	2.4	208~333	41.7~62.5
FP Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al	50	650	220	3.3	197	66.7
住友Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al	50	900	130	2.9	310	44.8

注: 此表还参考了有关生产厂产品说明数据。

他铝基复合材料优越。因此硼/铝复合材料目前在性能水平上是无可比拟的, 并仍有发展余地,

估计在未来的十几年内尚难以有别的金属基复合材料能超过。

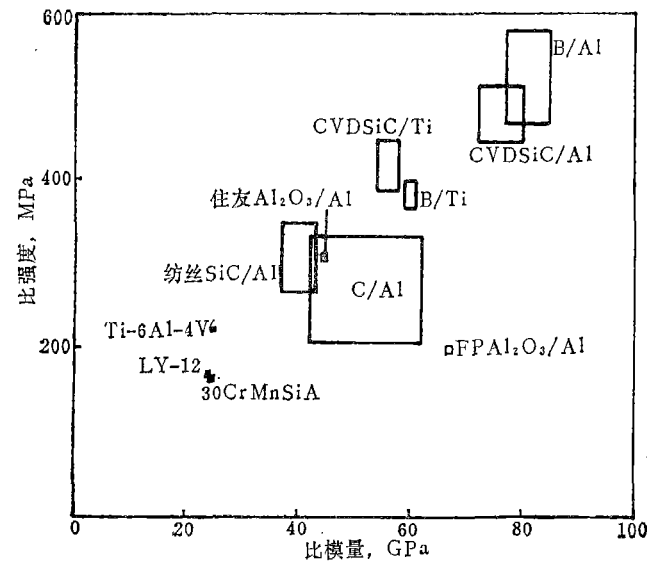


图 1 几种金属基复合材料性能对比(单向增强纵向性能)

### 工艺水平与使用经验分析

硼/铝复合材料自 60 年代初开始研究并逐步转入批量生产, 是金属基复合材料中发展历史最长的一种材料。多年来的研究与试验积累了大量的数据与丰富的经验。它的各种性能数据远比其他金属基复合材料齐全可靠, 便于设计采用。它的主要复合与成型工艺——热压扩散结合已十分成熟, 并已发展为模压、热等静压等多种形式。热压工艺所需的半成品如各种单层固结条带、等离子喷涂条带、编织条带等均已进入工业化生产。自1978年起美国硼纤维的年产量

一直维持在18吨左右,其中1/10用于制造硼/铝<sup>[7]</sup>。目前美国可以制造610×1830毫米的硼/铝板材,做过JT-8D、TF-30、J-79、F-100等发动机的风扇和压气机叶片<sup>1,2,8</sup>,做过F-106飞机的发动机检修门、F-111飞机的机身框架、DC-10飞机的后吊架蒙皮壁板、F-16飞机的起落架拉杆、阿特拉斯导弹的转接段,以及一些飞机和卫星的壁板、支柱、加强筋、蒙皮等。这些零部件均通过了试验,减重效果在20~66%不等<sup>[1]</sup>。从本文(上)所介绍的硼/铝管构件的制造工艺可以看出,硼/铝复合材料制造工艺的规模和成熟程度已经达到了相当高的水平。硼/铝管构件作为航天飞机中机身桁架支柱已成为金属基复合材料首次大量实际应用的范例。所有这些都是其他金属基复合材料远远不及的。

碳/铝的优点是纤维已工业化大量生产,价格便宜,材料比重较轻。尽管其研究历史很长,但相当长的一段时间内未能解决铝与碳纤维的浸润和反应问题。直到70年代中期研究出熔融钠-钾处理和钛-硼涂复两种工艺,解决了碳纤维与熔融铝液的自然浸润问题。其中钛-硼涂复工艺获得较大的发展。这种工艺是将碳纤维束在高温下通过具有三氯化硼、四氯化钛气体和锌蒸气混合气氛的加热炉,在锌蒸气的作用下钛-硼沉积于纤维上,然后直接进入熔融铝中浸铝制成复合丝;再将复合丝通过热压或铸造工艺制成板材和零件。钛-硼涂复工艺技术复杂,增加了成本,虽能解决浸润问题,却不能有效地防止碳纤维与铝的反应。因此经过两次复合以后性能往往不够稳定,强度有时还达不到硬铝合金的水平,工艺尚有待进一步完善。由于碳/铝还存在其他一些如抗蚀性差等缺点,对它的发展前景有一些争议。

CVD碳化硅纤维虽然几乎与硼纤维同时研制成功,但由于它的性能优势主要在高温区域,室温下不比硼纤维好,因此CVD碳化硅/铝发展较慢,只是近年着眼于未来的降价潜力才有所重视。1975年日本矢岛圣史发明了纺丝

碳化硅纤维,便于大量生产,近年又研制出含钛的新品种,给碳化硅/铝的研究注入了新的活力。由于纺丝碳化硅纤维是细纤维束,与铝复合较为困难,有害反应问题亦需解决。加之研究历史较短,目前复合工艺仍处于实验室阶段,尚缺少适合工业性大生产的定型工艺,没有制作大型零件的经验。近几年日本碳公司和我国国防科技大学均解决了纺丝碳化硅纤维束浸铝工艺,研制出复合丝,为纺丝碳化硅/铝今后的发展创造了有利条件。

应该看到,美国研制航天飞机中机身桁架支柱是在70年代初期,选择硼/铝在一定程度上受历史条件的局限。然而时至今日,尽管纺丝碳化硅/铝、碳/铝有了新的发展,但毕竟时间较短,无论从材料性能上还是制作工艺上仍有待进一步改善,离实际应用尚有一定距离。从目前情况来看,硼/铝在发展水平上至少超前其他铝基复合材料十年以上,仍然是当前第一位可以选择的材料。这一优势在本世纪内估计不会改变。是本世纪末乃至下世纪初确实靠得住的实用型金属基复合材料。

## 成本分析

美国航天飞机使用了硼/铝管构件经济效益究竟有多大?据AVCO公司人员透露,硼/铝管构件平均每根约7000美元,而航天飞机每减轻一磅可节省10000美元。这样,每架飞机价值约170万美元的硼/铝管构件因减重320磅,即可节省320万美元,因此是合算的。

硼/铝是否比其他铝基复合材料更贵?表3列举了几种主要纤维近一、两年的国际市场价格。由表可见,除碳纤维较便宜外,其他几种纤维都很贵。硼纤维价格比纺丝碳化硅纤维略贵,远低于CVD碳化硅纤维。若将性能联系起来考虑,由于其他几种材料性能均低于硼纤维,要达到同样的强度和刚度必需使用更多的原材料。因此硼纤维在价格上目前也是有竞争力的。所谓硼纤维贵的说法,应理解为在大规模工业生产的条件下硼纤维的降价潜力比其他几种纤

维小。但要扩大生产必须首先打开应用的局面。对于碳化硅纤维来说,近期内尚难以做到。另外必须着重指出,金属基复合材料价格昂贵不仅由于纤维,而加工过程技术复杂、成本高是一个更为重要的因素,后者往往成为价格的主要组成部分。据AVCO公司人员介绍,硼/铝管构件的成本主要来自加工过程,而不是原材料。从本文提供的情况与数据看确实如此。因此纤维的贵贱对复合管成本的影响并不十分明显。因为不论采用哪种纤维,管材的整个制造过程大体上是相似的。而且细纤维与金属复合一般要比粗纤维更麻烦些。因此,在相当的一段时期内,使用其他金属基复合材料制造航天飞机构件,成本不会比硼/铝便宜,而技术上还不如硼/铝先进可靠。因此即使从价格角度考虑,使用硼/铝也是合理的。

几点看法

通过对美国航天飞机应用金属基复合材料情况的分析,并结合当前金属基复合材料发展的动态,可以得到以下的看法和启示。

使用金属基复合材料可以使航天飞机获得明显的减重,具有较大的技术优势和经济效益。美国在70年代初期选择硼/铝复合材料作为中机身桁架支柱,不仅在性能上优越、工艺上可靠,而且在价格上也是合理的。虽然70年代后期碳化硅/铝与碳/铝有一些新的进展,但性能水平偏低,工艺尚不成熟,一时还很难大量应用,价格也难以降低。预计这样的格局在本世纪内不会有明显的改变。因此,在今后15~20年内硼/铝将继续保持自己的领先地位,仍然是

首屈一指的实用型金属基复合材料。然而也应该看到,碳化硅/铝、碳/铝在它们的发展过程中有可能突破技术难点,不断提高性能与工艺水平。这也正是近几年这方面研究工作比较活跃的原因,我们应给予足够的重视。前途如何,有赖于科研进展。金属基复合材料最终的格局不会是一花独秀,而是百花齐放。正象普通金属材料一样,不同合金、牌号,各有各的特点与优势。因此几种铝基复合材料的发展不是互相排斥,而是相辅相承。然而硼/铝在航天飞机上的优势地位,是难以被完全取代的。

从硼/铝管构件制造的实例还可看到,金属基复合材料技术复杂,投资昂贵。从纤维制造到最后零件成型,需要一系列的新技术、新工艺、新设备。大多数的工艺环节不可能直接利用现有的冶金和化工技术与装备。这在客观上就决定了发展金属基复合材料不可能一蹴而就,而需要长期不懈的努力,并在经费上给予必要的保障。而加强领导、统一规划则是利用有限的资金加速发展金属基复合材料的关键。

参考文献

[1] Renton, W.J., Hybrid and Select Metal-Matrix composites, AIAA, (1977).  
[2] Rubin, L., 航空材料, (1980), No.1, P35~40.  
[3] Kreider, K.G., 金属基复合材料, 国防工业出版社, (1982).  
[4] Furuta, T., Proceedings of NCKU/AAS International Symposium on Engineering Science and Mechanics, (1981).  
[5] Continuous Silicon Carbide Metal Matrix Composites, AVCO Specialty Materials.  
[6] Abe, Y., et al, ICCMW, Vol.2(1982), P1427~1434.  
[7] 于琨, 国际航空, (1980), No.3, P51.  
[8] 孙长义, 航空材料, (1986), No.6, P31.

表 3 几种主要纤维的价格 (根据1985~1987年有关资料)

纤维种类	硼纤维	CVD碳化硅		纺丝碳化硅	碳纤维
		碳芯	钨芯		
生产厂	AVCO(美)	AVCO(美)	SIGMA(西德)	碳公司(日)	
美元/公斤	880	2860	1970 <sup>①</sup>	600	50~80

①按每公斤3750西德马克折算。