

B/Al 复合材料的制造、性能及应用

张绪虎 胡欣华 关盛勇 曾凡文 汪翔

(航天材料及工艺研究所 北京 100076)

文 摘 综述了国内外 B/Al 复合材料的发展研究现状,具体介绍了几种制备技术的基本原理和工艺,包括热压扩散法、熔体浸渗法等。从工艺的角度分析了复合工艺参数——温度、时间、压力和环境对 B/Al 复合材料及对 B 纤维的影响。对 B/Al 复合材料的力学性能和在航空航天等方面的应用也做了较为系统的介绍,分析认为国内采用热压扩散法制备的 B/Al 复合材料性能稳定,其管材、型材已达到了应用阶段,为我国航空航天技术中应用此类复合材料奠定了基础。

关键词 B/Al 复合材料,热压扩散结合,力学性能,应用

Fabrication Methods, Mechanical Behavior and Applications of Boron/ Aluminum Composites

Zhang Xuhu Hu Xinhua Guan Shengyong Zeng Fanwen Wang Xiang

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology Beijing 100076)

Abstract Present status of domestic and overseas studies on B/Al composites is summarized. Its principles and fabrication techniques such as hot-pressing bonding method, infiltration method, etc. are basically reviewed. The effects of parameters of hot-pressing temperature, pressure, time and circumstance to mechanical properties of the B/Al composites and boron fiber itself are analyzed. The performance and applications of B/Al composites in aviation and aerospace are introduced in detail. Domestic B/Al composites made by hot-pressing method have reliable mechanical properties, and its tube and profile products have reached the stage of application. As a result, the successful fabrication of the B/Al composites offers a candidate advanced materials in aviation and aerospace industry.

Key words B/Al composites, Hot-pressing bonding method, Mechanical properties, Application

1 引言

纤维增强金属基复合材料(MMC)中,B/Al 复合材料发展较早,也最为成熟,它具有高比强度、高比刚度的独特性能,如比强度和比刚度分别是标准 Al 合金的 2 倍和 3 倍,为 4340 高强钢的 1.78 倍和 3.4 倍,是航空航天构件的理想候选材料。同碳/环氧及硼/环氧相比,B/Al 复合材料的比强度和比刚度都较低,但具有以下特点。

(1) 横向性能和剪切性能好。单向增强的 B/Al

复合材料,横向刚度为碳/环氧的 20 倍,剪切刚度为其 10 倍,横向强度也比较高。因此,可以单向增强使用,而树脂作为基体的复合材料,其力学性能较低,因此难以单向强化。

(2) 可以在较高温度(316)下使用。

(3) 不老化、不放气,对表面缺陷敏感性低,具有低的热膨胀系数和抗空间原子氧的作用,是制造长期在太空中工作、要求尺寸稳定的结构用的不可替代的材料。

收稿日期:1999-02-25

张绪虎,1966 年出生,硕士,主要从事金属材料、金属基复合材料的研究工作

宇航材料工艺 2000 年 第 1 期

— 19 —

(4) 易于连接。可进行电阻焊、钎焊、扩散焊或机械连接。

(5) 导电和导热性好,且对热冲击不敏感。

因此,B/Al 复合材料具有广阔的应用前景。美国是研制 B/Al 复合材料最主要的国家,在一些机种、导弹和航天飞机上,以 B/Al 复合材料制作的零部件已得到应用或通过试验阶段,减重效果达 20%~66%。俄罗斯为了航天产品的需要,也主要研究并应用了 B/Al 复合材料,其性能同美国 B/Al 复合材料性能相当,并于 80 年代达到了实用程度。我国对 B/Al 复合材料的研究始于 70 年代,目前航天材料及工艺研究所已具备了生产不同规格 B/Al 复合管和复合型材的能力,其板材、管材和型材的性能同世界先进国家生产的 B/Al 复合材料性能相当,并达到了实用阶段。本文着重对 B/Al 复合材料的制备方法、性能和国内外应用情况进行了综述。

2 B/Al 复合材料的制造

制造 B/Al 复合材料的方法很多,但常用的工艺有两种^[1]:一种是纤维与基体的组装压合和零件成型同时进行的一步法;另一种是先加工成复合材料的预制品,如无纬布等,然后把预制品叠层并压合成最终形状的零件的二步法。无论是一步法还是二步法都有相同的问题,如纤维的精确排列,纤维间距与体积比的控制,以及对孔隙和缺陷的控制。同样重要的还有热力学和化学动力学的问题,如压合过程中的氧化以及组分(B 与 Al)之间的结合与反应。这两种工艺统称为热压扩散结合法。另外,制造 B/Al 复合材料的方法还有熔体浸渗法等。

2.1 热压扩散法

大多数 B/Al 复合材料是用预制品或中间复合材料制造的。工艺流程的基本原理是先将增强纤维按设计要求与金属基体组成复合材料预制品,并将预先制成的预制品裁剪成所需的形状、叠层排布,放入热压模具内,预制品在热压过程中基体金属发生塑性变形,氧化膜破裂,基体金属逐渐充填到增强纤维之间的间隙中,使金属与增强物之间紧密粘在一起。此时也发生基体金属与增强物之间元素的扩散反应。

2.1.1 预制品的制备方法

预制品的制备方法常用的有两种:等离子喷涂法和挥发性粘结剂法。此外,还有分段加压法和轧

制结合法。

a) 等离子喷涂法

等离子喷涂制备预制品的工艺过程是先将 B 纤维缠绕在滚筒上,纤维之间保持一定的距离,然后放在喷涂装置中喷涂基体金属,形成含有增强纤维的预制品。航天材料及工艺研究所制造的预制品(也叫无纬布)可达 1 600 mm × 1 000 mm,其厚度为 230 μm ~ 300 μm,无纬布的纤维线密度为 53 根/cm ~ 58 根/cm。为保证纤维的距离一致,采用了特制的方法,即在尺寸为 550 mm × 1 054 mm 的滚筒表面上加工了螺距为 0.18 mm 的螺纹,使喷涂后制得的无纬布纤维排列均匀。喷涂后,基体材料已渗入纤维之间。这种工艺的特点是:喷涂后预制品的耐久性和强度好,且易于复合粘结。喷涂后的基体十分疏松,并在纤维上隆起脊状,据文献[2]报道气孔率达 15%。通过随后热压工艺可使这些带孔隙的基体产生塑性变形,使氧化膜破裂,从而有助于 Al 的扩散结合。

b) 挥发性粘结剂法

先在滚筒上包以 Al 箔,再以适当的间距,按设计的体积分数缠上 B 纤维,尔后在纤维上喷上加热易挥发的有机粘结剂(如聚苯乙烯)和相应的溶剂(如二甲苯),使纤维和 Al 箔结合在一起,然后从滚筒上取下制成一定尺寸的预制带。为了确保随后复合的完好,有机粘结剂必须完全挥发和不留杂质。

c) 分段加压法

B 纤维被夹在基体箔中间喂入压机,然后在一定的温度、压力下加压复合,经过一段时间后,压机张开,形成的薄板预制品向前移动,接着又重复下一个循环。

d) 轧制结合法

此法是利用加压加热制备预制品的工艺。此法要求首先在移动着的两层 Al 箔中间连续地喂入 B 纤维。此后,夹层材料由轧辊当中穿过进行扩散结合。此工艺是连续的,主要的问题是轧辊加压时造成纤维破碎和纤维的位置不易控制。后一问题可用带槽的 Al 箔加以解决。

2.1.2 铺层工艺

用挥发性粘结剂和等离子喷涂工艺生产的预制带,必须叠层排布和压合才能做成复合材料。采用树脂粘结剂的预制品,需在热压前除去树脂,靠机械

宇航材料工艺 2000 年 第 1 期

作用使纤维和 Al 箔保持原位。典型的情况是,在 400 真空下保持 1 h 便可以去掉聚苯乙烯残渣。其他的树脂(如丙烯)强度较高,但蒸发率不如聚苯乙烯高。

2.1.3 热压工艺

热压过程是整个工艺流程中最重要工序。控制好热压参数——温度、压力、时间和气氛是重要的,否则在恶劣的条件下,会使复合材料的强度降低。B/Al 复合材料的力学性能不但受 B 纤维力学性能的支配,而且还和界面状态、复合气氛等因素有关。一般说来,如果发生界面反应,如生成 AlB_2 和 AlB_{12} 等脆性化合物,不但要严重损伤纤维,而且复合材料的强度还会发生急剧下降^[3],但是,为了界面粘结,适度存在界面反应物有时还是必要的。B 纤维在热压过程中的氧化控制也是很重要的。虽然 B 纤维具有较好的高温强度,在 400 时能保持室温强度的 60%~80%,但超过 400 在空气中暴露时,纤维受到比较严重的氧化^[4],性能也开始降低。因此,在用无涂层 B 纤维制备复合材料时,须用惰性气体保护。为了克服过度的界面反应和 B 纤维易于氧化的缺点,美国 Hamilton 公司制备了表面包覆碳化硅的 Borsic 纤维(见图 1),涂层的厚度为 $2\ \mu\text{m}$ ~ $3.75\ \mu\text{m}$,大大提高了 B 纤维在空气和金属基体中的稳定性。

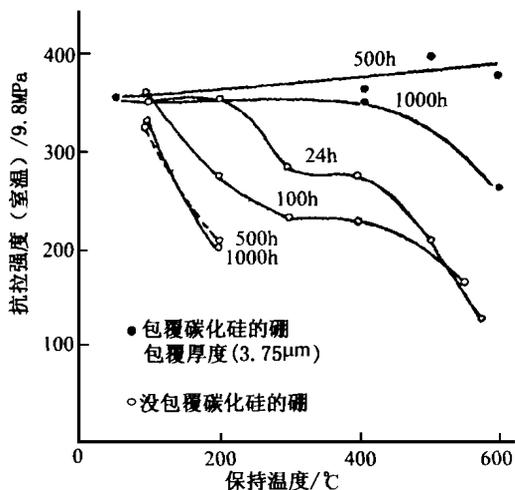


图 1 Borsic 纤维和 B 纤维在基体 Al 中的稳定性

Fig. 1 The stability of Boric fiber and B fiber in Al matrix

图 1 表明,没有涂层的 B 纤维与 Al 接触时,在 200 长时间放置就产生退化,超过 400 退化非常

宇航材料工艺 2000 年 第 1 期

迅速。而有涂层的 B 纤维在 400 保持 1 000 h 后室温强度几乎不变,在 600 保持 1 000 h 后室温强度仍超过 2 100 MPa。Basche^[5]认为无论是在空气中还是在金属基体中,纤维拉伸强度的退化受 B 纤维扩散穿过碳化硅层速率的控制,因此涂层的厚度有很大影响。在和熔融的 Al 接触时,由于 B 和 Al 的活性都很好,反应很快,对 B 纤维造成致命的破坏。碳化硅同熔融 Al (680)接触时的稳定性比 B 纤维高,因此,在 B 纤维表面涂覆碳化硅层是非常有利的,它能阻止纤维和基体在复合过程中由于温度变化可能产生的界面反应,避免纤维退化。另两种带涂层的 B 纤维是表面涂有 B_4C 和 BN 纤维保护层的纤维。加涂层后 B 纤维强度基本上无变化,但减轻了在熔融 Al 中的侵蚀。对于纤维无涂层 B/Al 复合材料,在压合过程中有下述一些重要因素的限制:

- (1) 由于纤维有损伤问题,因此时间—温度有一定的限制;
- (2) 为保证良好的结合和消除孔隙,时间、温度、压力参数必须高于一个临界值,因为这是一个同时受蠕变和扩散限制的过程;
- (3) 高压会增加纤维的断裂;
- (4) 用形状复杂的闭合模具制造零件时,在热压过程中有相当大的压力梯度;
- (5) 为防止 B 氧化要仔细控制好气氛。

传统的 B/Al 复合材料制备必须在真空或惰性气体保护下进行,但国外也用大气下热压扩散法制备了 B/Al 复合材料^[6],其热压工艺参数为 565 下在 28 MPa 压力下复合 15 min。结果发现,复合材料的性能同真空热压的 B/Al 复合材料性能相等。若 B 纤维带有涂层,这些限制可以放宽或不予考虑,因为制造过程中可以使用高得多的温度而不会使纤维损伤。常用的热压参数见表 1。

表 1 热压结合参数^{*[6]}

Tab. 1 Parameters of hot pressing bonding			
纤维	温度/	压力/MPa	时间/min
无涂层	450~500	>70	>70
Borsic	500~600	14.0~70.0	3~180

*真空度为 1.33×10^{-3} Pa。

2.2 熔体浸渗法(连续铸造法)

该法是让熔融金属浸渗单向排列的纤维束,也即将纤维通过熔融金属,在以金属包覆的状态下连

续拉出的方法。图 2 是采用该法,用二步法工艺制备的局面增强的 B/Al 复合型材。

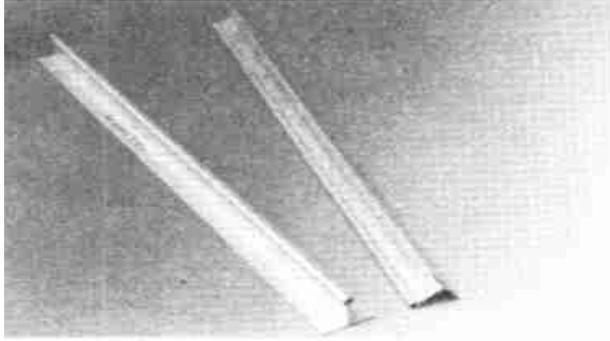


图 2 熔体浸渗法制造的局面增强 B/Al 复合“T”型材
Fig. 2 Partial reinforcement “T” shape B/Al by infiltration method

这种工艺要求液态金属和纤维系统必须稳定,至少反应足够慢。由于 B 纤维在熔融 Al 中不够稳定,目前这一复合工艺采用带 SiC 和 BN 保护层的 B 纤维,这种方法生产效率高、成本低,但仅限于生产横截面、纤维单向排列的结构件,对于多向排列的或变截面的复合材料,目前还只能靠热压扩散工艺进行复合。近年,航天材料及工艺研究所应用热压扩散法成功地制备了 60 mm × 1 200 mm × 2 mm、40 mm × 1 020 mm × 1 mm、34 mm × 1 020 mm × 1 mm 等不同规格的复合管(见图 3)和不同规格的各种型材(见图 4)。

管材的复合采用了外加承力环,内加蒸汽压的方法。复合温度较低,而且在制造带连接头的管材时,可将管材的复合和管接头的焊接工序合二为一。采用内压法,防止了无纬布在复合过程中发生堆积而影响复合质量。

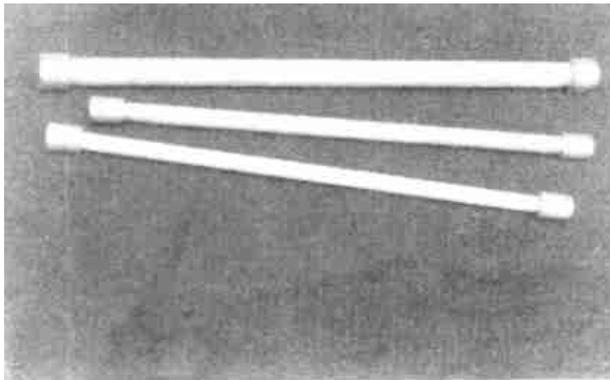


图 3 B/Al 复合管
Fig. 3 B/Al tube

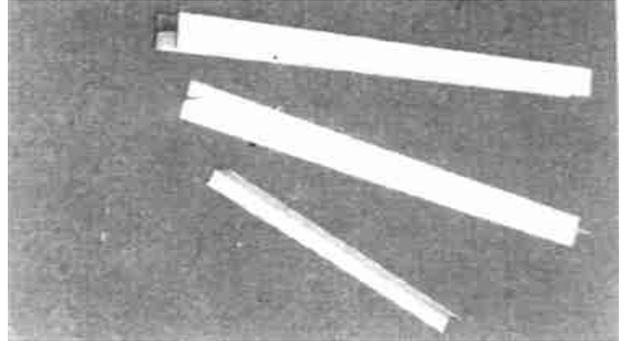


图 4 B/Al 复合型材
Fig. 4 Different shapes of B/Al composites

3 B/Al 复合材料的性能

B/Al 复合材料的性能取决于铺层的叠放结果。一般来说,单向铺层纵向(平行于纤维方向)性能主要是由纤维的性能决定的,而横向性能主要是由基体材料决定的,同时还与纤维和基体的界面结合程度、纤维体积分数和纤维排列方式等因素有关。

图 5 ~ 图 14 和表 2 给出了 B/Al 复合材料的不同性能。B/Al 属伪一类复合材料, Klein 和 Metcalf^[7] 认为在纤维和基体间有一层氧化膜,复合工艺参数选择过高或经受一定的时间热暴露后,氧化膜会破裂和球化,从而使纤维和基体直接接触发生反应。反应可在界面生成三种不同的硼化物: $(Mg, Al)B_2$ 、 $-AlB_2$ 和 $-AlB_{12}$ 。这些脆性反应物导致了纤维的损伤和界面的应力集中,从而使 B/Al 复合材料的力学性能下降,如图 9 和图 10 所示。

目前对 B/Al 这类长纤维增强复合材料的理论力学性能预测模型有很多,如混合定则、Rosen 定则和 Zveben 定则,但这些模型都进行了理想化处理,同实测值有一定的差异。K·F·Karlak、F·W·Crossman^[8] 用有限元分析法对单向增强的 B/Al 复合材料在横向载荷、偏轴载荷下的变形、屈服和断裂行为进行了研究,预测了 50—V/O B/Al (6061—0 和 60161—7) 复合材料的力学性能。FEM 使用的范围很广,它可以用来分析几乎所有的结构和在复杂载荷条件下,包括界面的脱粘、纤维的横截面变化和 B/Al 复合材料从非均匀弹性变形到断裂的所有细节。

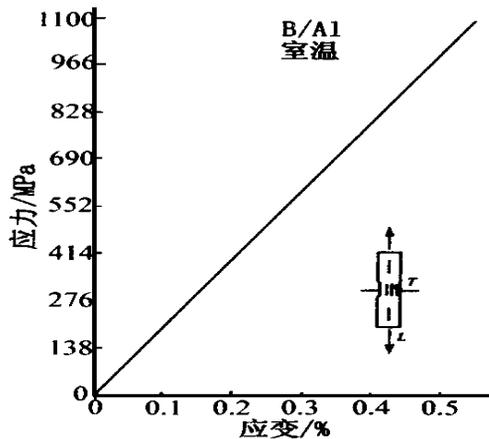


图5 单向铺层 B/Al 复合材料典型纵向应力—应变曲线
Fig. 5 Typical stress-strain curve for B/Al in longitudinal tension

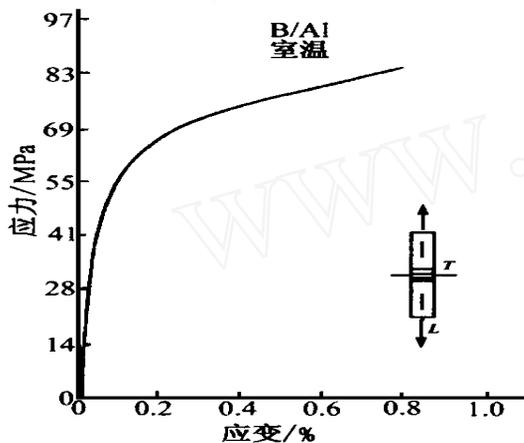


图6 单向铺层 B/Al 复合材料典型横向应力—应变曲线
Fig. 6 Typical stress-strain curve for B/Al in transverse tension

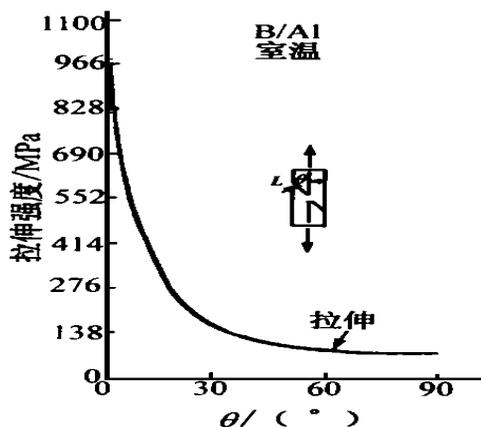


图7 偏轴加载下 B/Al 复合材料的拉伸强度
Fig. 7 Tension strength for off-axis loading B/Al

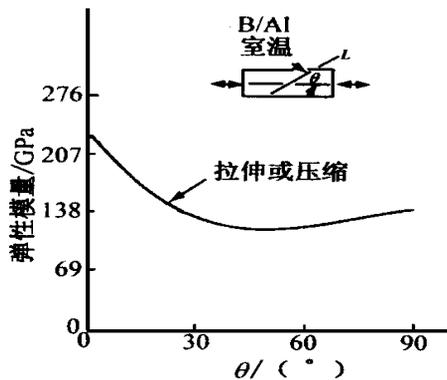


图8 偏轴加载下 B/Al 复合材料的弹性模量
Fig. 8 Elastic modulus for off-axis loading B/Al

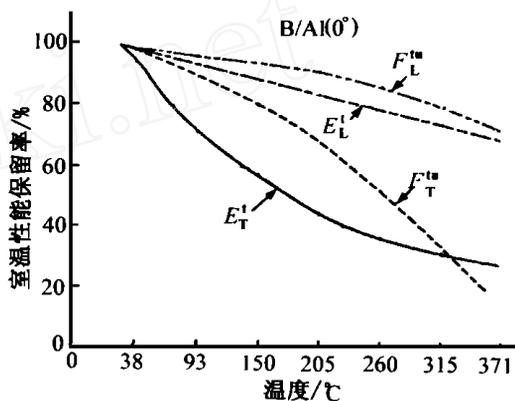


图9 纵向和横向加载下 B/Al 复合材料的强度和模量随温度的变化
Fig. 9 Strength and modulus vs temperature of B/Al in longitudinal and transverse tension

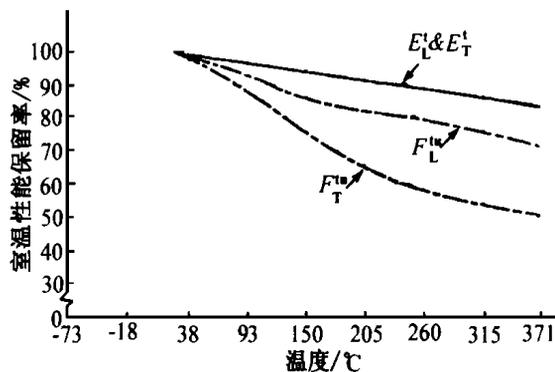


图10 不同铺层(0°/90°) B/Al 复合板纵向横向加载下强度和模量随温度的变化
Fig. 10 Strength and modulus vs temperature of B/Al (0°/90°) cross-ply in longitudinal and transverse tension

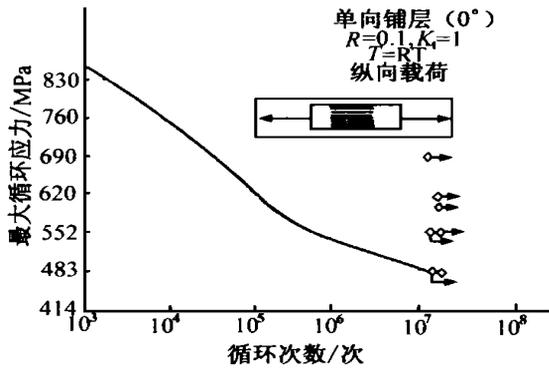


图 11 B/Al 复合材料恒振幅时纵向加载疲劳曲线

Fig. 11 Constant amplitude fatigue of B/Al longitudinal loading

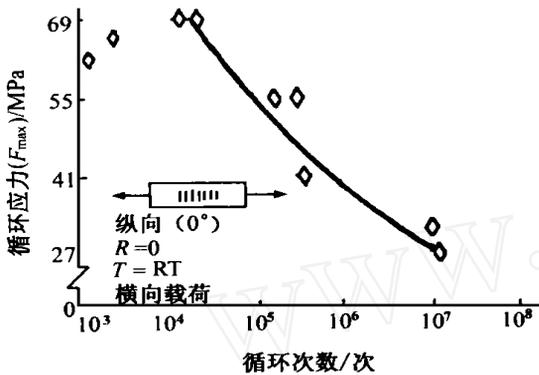


图 12 B/Al 复合材料恒振幅时横向加载疲劳曲线

Fig. 12 Constant amplitude fatigue of B/Al transverse loading

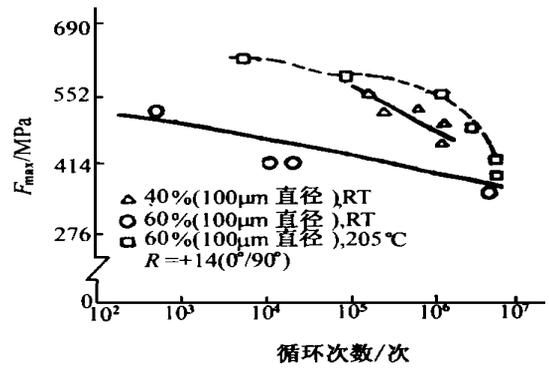


图 13 0°/90° 纵向拉-拉疲劳应力—应变曲线

Fig. 13 Longitudinal tensile-tension fatigue stress-strain curves

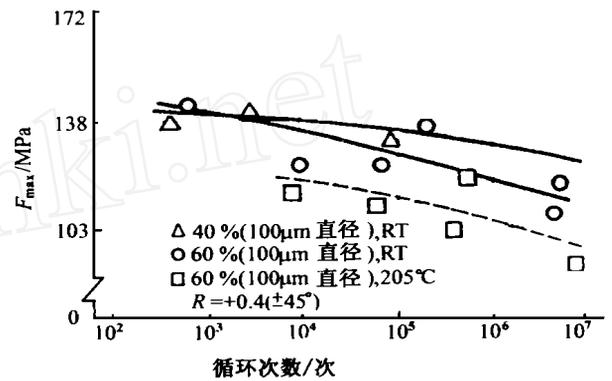


图 14 ±45° 纵向拉-拉疲劳应力—应变曲线

Fig. 14 Longitudinal tensile-tension fatigue stress-strain curves

表 2 B/Al 复合材料室温性能(V_f = 50 %) [9]

Tab. 2 Room temperature properties of (0°) B/Al with 50% filament by volume

方向	拉伸强度 / MPa	拉伸模量 / GPa	压缩强度 / MPa	压缩模量 / GPa	平面剪切 强度/ MPa	平面剪切 模量/ GPa	层间剪切 强度/ MPa	断裂应变 / %	泊松比	密度/ g cm ⁻³	热膨胀系数 / 10 ⁻⁶ · K ⁻¹
0° 纵向	1 100	235	1 215	207	69	66	126	0.5 ~ 0.6	0.23	2.7	5.8
0° 横向	110	138	159		69	66	126	0.6 ~ 1.2	0.17	2.7	19.1
0°/90° 纵向	483	145	607	145	103	-	96	0.67	-	2.7	-
0°/90° 横向	483	145	607	145	103	-	96	-	-	2.7	-

从以上图表可以看出, B/Al 复合材料不但有高的力学性能, 而且有好的抗疲劳性能。国内生产的 B/Al 复合板材、型材拉伸强度已达 1 200 MPa、模量达 220 GPa, 并且性能离差控制在 10% 以内。对管材分别进行了整管的拉压试验, 接头没有出现破坏现象, 其结果如表 3。表 4、表 5 是管材物理性能及力学性能。

表 3 B/Al 复合管的整体拉压试验

Tab. 3 Test results of B/Al tube

编号	规格/mm	拉力/kN	压力/kN	试验 结果
1,2	60 × 1 200 × 2	200	200	完好
3,4	60 × 1 200 × 2	200	200	完好
5,6	40 × 1 020 × 1	60	38	完好
7,8	34 × 1 020 × 1	50.7	22.5	完好

表4 B/Al复合管的物理性能*

Tab.4 Physical properties of B/Al tube

增强方向的线膨胀系数/ $10^{-6}K^{-1}$		增强纤维径向的线膨胀系数/ $10^{-6}K^{-1}$		增强方向的热导率/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$		增强纤维径向的热导率/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$		比热容 C_p / $J \cdot K^{-1}$	
温度/	测量值	温度/	测量值	温度/	测量值	温度/	测量值	温度/	测量值
-150~20	5	-150~20	11.4	-150	26.0	20	38	-100	542
-50~20	6	-50~20	13.5	-50	38.0	100	40	-50	732
20~100	8	20~100	16	20	45	200	43	20	1 000
20~200	8	20~200	17	100	45	-	-	100	1 150
-	-	-	-	200	46	-	-	200	1 350

*密度为 $2.56 g \cdot cm^{-3}$ 。

表5 B/Al复合管的力学性能

Tab.5 Mechanical properties of B/Al tube

试验温度 $T/$	增强方向的弹性模量 E/ GPa	增强纤维径向的弹性模量 E/ GPa	剪切模量 / GPa	泊松系数	增强方向的拉伸极限强度 / MPa	增强方向的压缩极限强度 / MPa	增强纤维的径向拉伸极限强度 / MPa	弯曲极限强度 / MPa	拉伸变形极限值 / %	压缩变形极限值 / %
-190	255	157	50	-	1 079	1 180	69	-	0.42	0.46
20	255	157	50	0.23	1 079	1 180	69	1 079	0.42	0.46
100	245	147	46	-	1 070	1 128	69	-	0.42	0.46
150	235	137	44	-	1 019	1 030	59	-	0.42	0.44

4 应用及展望

B/Al 复合材料具有高的比强度、比模量、尺寸稳定性好等一系列优异性能,是实际应用最早,也最为成熟的金属基复合材料。美国、俄罗斯是研制 B/Al 复合材料最主要的国家,以下是美、俄已在实际应用和正在进行试验的 B/Al 复合结构件及在航天结构中的设想方案。

(1)美国在航天飞机中机身上采用了 B/Al 复合管^[10]。它作为主要骨架和肋条桁架的支柱、骨架稳定支架、制动品支撑柱等,在首批 3 架航天飞机上得到了应用。每架航天飞机上安装了 243 根 B/Al 复合管,全部 B/Al 复合管质量为 150 kg。这些复合管桁架构件,达到了航天飞机实际飞行的全部要求,比最初 Al 合金挤压件的方案在中机身结构部分,可减重 145 kg,相当于质量减低 44 %^[10],节省了空间,改善了飞行器内部通道。

(2)美国普拉特·惠特尼(Pratt & Whitney)发动机公司用等离子喷涂、真空热压成形工艺研制了 JT8D 发动机第一级风扇叶片、TF30 第三级风扇叶片,通过了试验台、腐蚀及抗外来物冲击试验,比原

使用的钛叶片轻 40 %。由于结构的改进而使发动机效率得以提高。

(3)美国 P&WA 公司和 TRM 公司用等离子喷涂 6061Al 的 B/Al 预制带成功地制成了 F100 发动机第一级风扇叶片及第一级出口导向叶片,通过了静载、热疲劳、试验台试验,减重达 35 %~40 %。

(4)美国在 1968 年用 B/Al 复合材料制作了 Atlas 导弹转接壳,它是一个加筋蒙皮的圆柱壳,桁条为帽形截面件,由板材热压成形。蒙皮由 1.22 m × 1.22 m 的 Al 板在环轧机上室温成形,半径为 0.63 m,桁条与蒙皮间用铆接与电阻点焊方法连接。每个转接壳约重 13.6 kg,比原来全 Al 结构节省质量约 40 %。

(5)美国还在卫星 OV-1 天线桁架结构中用 B/Al 复合管和型材。该结构高 2.04 m、宽 0.76 m × 0.76 m,这种承力结构提高了有效载荷,可减重 51 %。此外,美国还计划在航天飞机的主起落架柱杆、中机身上翼壁板、受压壁板上采用 B/Al 复合材料;计划在空间站上使用 B/Al 复合材料。

(6)俄罗斯不仅在 B/Al 复合材料的研究上,而

且在生产和应用上处于世界领先地位。俄罗斯用 B/Al 复合管研制了可同时放置 3 颗卫星的支架,见图 15。此结构若用钛合金,需 150 kg ~ 160 kg,而用 B/Al 为 100 kg,结构热稳定性好,并且取得了明显的减重效果^[12]。

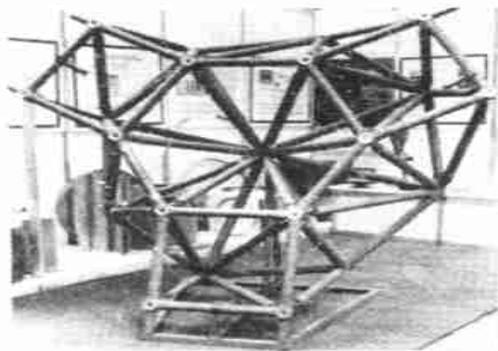


图 15 可同时放置 3 颗卫星的 B/Al 复合管架结构
Fig. 15 The B/Al tube structure to support three satellites

(7) 俄罗斯还用实芯的 B/Al 型材及局部增强的 B/Al 型材,研制了安装仪器的框架结构及空间太阳能电池支架。与 Al 合金相比,其质量减轻 40%,同时保证了所带仪器对阻尼特性的要求^[12]。

(8) 俄罗斯研制的 B/Al “T” 型材,用它做纵向加强肋,可以提高壳体结构的轴向承载能力 50% ~ 100%^[12]。

虽然 B/Al 复合材料是航空、航天等高新技术领域的理想结构材料,但由于 CVD 法制备的 B 纤维成本十分昂贵,其应用范围受到一定的限制。但航空、航天飞行器的升空成本非常高,如人造卫星约为 12 万元/kg,宇宙飞船高达 18 万元/kg,因此在航空、航天等领域中使用高的强度和比模量的 B/Al 复合材料

的经济效益还是十分可观的^[13],其应用前景还是非常广阔的。航天材料及工艺研究所对 B/Al 复合管、复合型材的成功研制,为我国航空航天技术中应用此类复合材料奠定了基础。

参考文献

- 1 Jacques E et al. Introduction to Metal Matrix Composite Materials. California: DOD Metal Matrix Composites Information Analysis Center, 1982: 5 ~ 17
- 2 库吉诺夫 B B. 等离子涂层. 北京: 科学出版社, 1981: 169
- 3 张绪虎等. B/Al 单向铺层复合板的力学性能及断裂行为的研究. 宇航材料工艺, 1998; (3): 54 ~ 60
- 4 Rizzo H F. Boron, Synthesis, Structure and Properties. New York: plenum press, 1960: 175
- 5 Bache M. Interfaces in composites. ASTM—STP—452, 1969: 130
- 6 Boron reinforced aluminum metallic matrix composites, Composite Materials, 1974
- 7 Klein MJ et al. Effect of interface in metal matrix composites on mechanical properties. Technical Report, AFML - TR - 72 - 226, Air Force Contract, F33615 - 70 - C - 1814
- 8 Karlark R F et al. Reinforcement mechanism in metal matrix composites, AD - A032407
- 9 Advanced Composites Design Guide, prepared under Contract F33615 - 74 - C - 5075, by Rockwell International, for Wright Patterson Air Force Base, September, 1976
- 10 Weisinger M D. Composite struts pave space shuttle weight. Metal Progress, 1978; 113(5): 60
- 11 Weisinger M D. Application of Boron/ Aluminum tubes to space. Society Manufacturing Engineers, EM75—116, 1975
- 12 刘向群. 前苏联 B/Al 复合材料在航天产品上的应用情况. 宇航材料工艺, 1993; 23(1): 47 ~ 49
- 13 Christian J L. In: Scala E ed. proc. of ICCM 1. USA, 1976: 706 ~ 714

简 讯

经国务院新闻办、国家新闻出版署审核备案,《宇航材料工艺》由《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》全文收录,并且本刊作为《中国学术期刊综合评价数据库》、《中国科学引文数据库》来源期刊,全文收录,收录期限为 1994 年 ~ 2002 年。

· 本刊编辑部 ·