

# 热等静压法制备 B/Al 复合型材的研究

曾凡文 张绪虎 关盛勇 胡欣华 苏肇健

( 航天材料及工艺研究所 北京 100076 )

**摘 要** 介绍了热等静压法制备 B/Al 复合型材的工艺流程,对热等静压法制备 B/Al 复合型材的工艺进行了探索研究,获得了制备 B/Al 复合型材的最佳工艺参数。试验表明,利用热等静压法可得到组织均匀致密、性能优良的 B/Al 复合型材,可一次成型多根质量符合要求的常用形式的 B/Al 复合型材。

**关键词** B/Al 复合材料,型材,热等静压法

## Preparation of Profiled B/Al Composites by Hot Isostatic Pressing Method

Zeng Fanwen Zhang Xuhu Guan Shengyong Hu Xinhua Su Zhaojian

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

**Abstract** Manufacturing process of profiled B/Al composites by hot isostatic pressing method (HIP) is introduced and studied. The best process parameters of HIP to make the profiled B/Al composites are obtained and several normal profiled composites bars can be fabricated at a time. Results show that the B/Al composites with a compact and uniform microstructure have excellent mechanical properties.

**Key words** B/Al composites, Profiled, Hot isostatic pressing

### 1 前言

B/Al 复合材料具有很高的比强度和比模量,可作主承力构件,是一种比较理想的结构复合材料,已在美国、俄罗斯的一些航空、航天飞行器上得到了广泛的应用,减重效果达 20%~66%不等<sup>[1~3]</sup>。主要使用的是 B/Al 复合管材、型材以及少量的 B/Al 复合板材。我们在用热压扩散结合法成功研制出 B/Al 复合板材之后,对 B/Al 复合型材的制备工艺进行了探索研究,利用热等静压法获得了各种长度在 1 m 以内的 B/Al 复合型材,以期在 B/Al 复合材料在我国的实际应用奠定基础。

有人曾用热压及包覆板弯曲成型技术、连续铸造、钎焊等工艺制造 B/Al 复合型材<sup>[4]</sup>,但这些工艺难以制造形状复杂的型材,而且材料的整体性能也不太均匀。热等静压是一种先进的材料成型技术,

可制造形状复杂的金属基复合材料零件。其优点是金属基体与增强物的复合和成型可一起完成,制成的复合材料零件组织均匀致密,无缩孔、气孔等缺陷,性能均匀。各种型材是最常用的结构件,因此,研究热等静压法制备 B/Al 复合型材的工艺具有十分重要的现实意义。

### 2 试验过程

#### 2.1 试验材料

用等离子喷涂法自制的 B/Al 复合材料无纬布,平均厚度为 0.28 mm,纤维线密度为 53 根/cm~58 根/cm。其中增强剂是直径为  $(140 \pm 5) \mu\text{m}$  不带涂层的碳纤维,基体材料是直径为 1.6 mm 的 LF6 铝丝。

#### 2.2 试验设备

瑞典 ABB 公司生产的 QIH-32 型热等静压机。

收稿日期:2000-02-12

曾凡文,1969 年出生,工程师,主要从事金属基复合材料的研究工作

### 2.3 试验方法

由等离子喷涂法制得的 B/Al 复合材料无纬布,纤维上的基体比较疏松,相对密度为 85%~95%<sup>[5]</sup>,必须通过热压成型工艺,使喷涂的基体致密化和强化,从 B/Al 无纬布最终制成 B/Al 复合型材。用热等静压法制备 B/Al 复合型材的工作原理及设备示意图如图 1 所示。将 B/Al 复合材料无纬布铺排在试验工装中,在金属包套抽真空密封后装入热等静压机中加热、加压,到预定温度和压力之后保持一定时间。这样,经过高温高压即可复合而成 B/Al 复合型材。用热等静压法制备 B/Al 复合型材的工艺流程如图 2 所示。

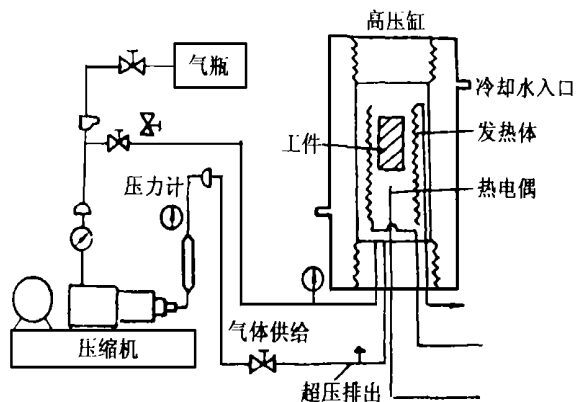


图 1 热等静压机工作原理和设备示意图

Fig. 1 Principle and schematic diagram of HIP machine

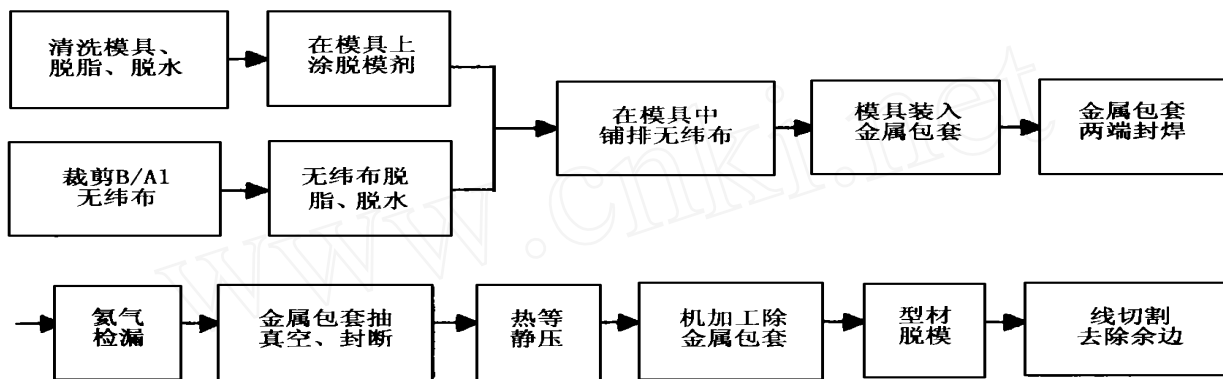


图 2 B/Al 复合型材的制备工艺流程图

Fig. 2 Flow chart of B/Al composite preparation

### 3 结果与讨论

采用等离子喷涂法制取 B/Al 复合材料无纬布,以热等静压方法制备 B/Al 复合型材的复合技术,国内外资料尚未见报道。试验表明,该技术方案确实可行,可一次成型质量符合要求的常用形式的 B/Al 复合型材。而且该方法适用性强,可一次成型多根 B/Al 复合型材,成型模具也可多次反复使用。研制出的部分 B/Al 复合型材如图 3 所示。热等静压复合工艺在真空状态(真空度  $P = 1.33 \text{ Pa}$ )下进行,可有效防止基体铝合金发生过度的氧化反应,这对基体与硼纤维之间的复合也是很有利的。另外在热等静压过程中,由于金属包套圆周的各个方向上受力相等,因此得到的 B/Al 复合型材的各个部位的组织均匀致密,性能的一致性很好。但在试验过程中我

宇航材料工艺 2000 年 第 4 期

们发现,试验工装和热等静压工艺参数对复合型材的质量及性能有着十分重要的影响。

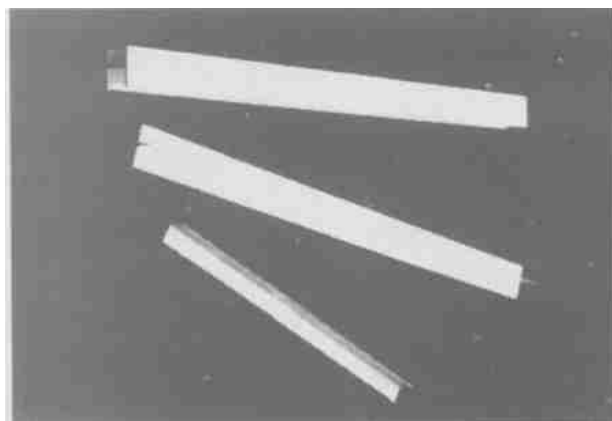


图 3 热等静压法制得的 B/Al 复合型材

Fig. 3 Profiled B/Al composites made by HIP

### 3.1 试验工装对复合型材质量的影响

用热等静压法制备 B/Al 复合型材时,由于基体铝合金与硼纤维的复合与成型是一次完成的,因此试验工装对整个试验的成败以及复合型材的质量均有重要影响。成型模具必须清洗干净并脱脂、脱水,这样便于在模具上涂上一层均匀的脱模剂,以保证 B/Al 复合型材表面的平整性,而且复合材料内部不至于产生气孔等缺陷。

成型模具必须有足够的强度和刚度,在复合温度和压力下不产生可被检测出的塑性变形,使模具按照预定的方向移动,以保证得到预定 B/Al 复合型材的形状,以及整段复合型材的直线度和厚度的一致性。

金属包套、真空状态下抽气管封断后的封口必须具有一定的气密性,这是确保整个试验成败的关键。如果整套工装的气密性不高,在热等静压时高压缸中的工作气体会逐渐渗入包套内,包套内外表面的压力逐渐趋于平衡而不会继续产生变形,使成型模具失去产生定向移动的条件,从而导致整个试验的失败。用 ZHP-30 型氦质谱检漏仪采用氦质谱喷吹法对金属包套焊缝进行检漏,包套焊缝氦总漏率  $Q < 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  量级即可保证试验的顺利进行,得到质量良好的 B/Al 复合型材。

### 3.2 工艺参数对复合型材性能的影响

热等静压制造金属基复合材料工艺过程中,温度、压力、保温时间是主要的工艺参数,温度是保证工件质量的关键因素,一般选择的温度低于热压固结的温度,有利于防止严重界面反应。在总结热压扩散结合法制备 B/Al 复合板材的工艺基础之上,本次制备 B/Al 复合型材的试验过程中采用的工艺参数为:温度  $500 \sim 520$ 、压力  $70 \text{ MPa}$ 、保温时间  $1 \text{ h} \sim 2 \text{ h}$ 。当热等静压温度为  $500$ 、压力为  $70 \text{ MPa}$ 、保温时间为  $1 \text{ h}$  时,得到的 B/Al 复合型材的性能不太理想,在扫描电镜下能看到 B/Al 无纬布之间有分层现象,基体铝合金的流动性差,基体之间的流动也不够充分,没有完全充满硼纤维之间的间隙(见图 4)。产生这种情况的原因是温度偏低,保温时间过短。由于本次试验的工装都比较大,因此需要较高的复合温度和较长的保温时间,这样有利于基体充分流动,保证铝合金与硼纤维充分接触,充填硼纤维之间的所有间隙。另外,升温的速率不能太快,以使模具

完全热透,否则由于模具内外表面之间存在温度差,纤维与基体达不到预定的温度而不能充分复合。

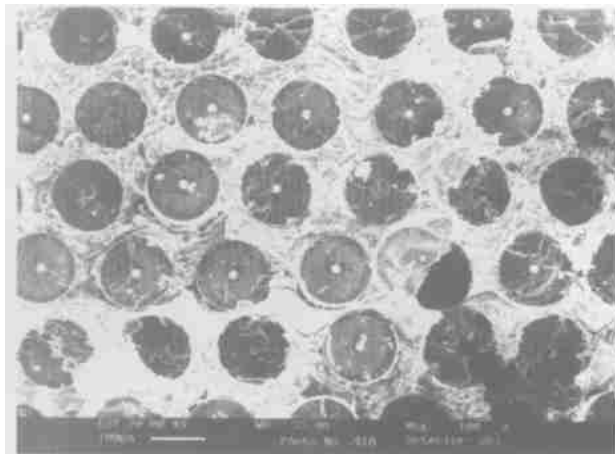


图 4 在  $500$ 、 $70 \text{ MPa}$ 、 $1 \text{ h}$  条件下制备的 B/Al 复合型材拉伸断口形貌  $100 \times$

Fig. 4 Tensile fractograph of B/Al composites ( $500 / 70 \text{ MPa} / 1 \text{ h}$ ,  $100 \times$ )

当热等静压温度大于  $510$ 、压力为  $70 \text{ MPa}$ 、保温时间大于  $1.5 \text{ h}$  时,得到的 B/Al 复合型材的性能比较理想。从丁字型材 XC211-14 的边缘取样进行力学性能测试,其室温拉伸强度为  $1071 \text{ MPa}$ 、拉伸弹性模量为  $212 \text{ GPa}$ 、压缩强度为  $1840 \text{ MPa}$ 、压缩弹性模量为  $219 \text{ GPa}$ ,比基体铝合金 LF6 的力学性能有了显著地提高。图 5 是试样拉伸断口的扫描照片。

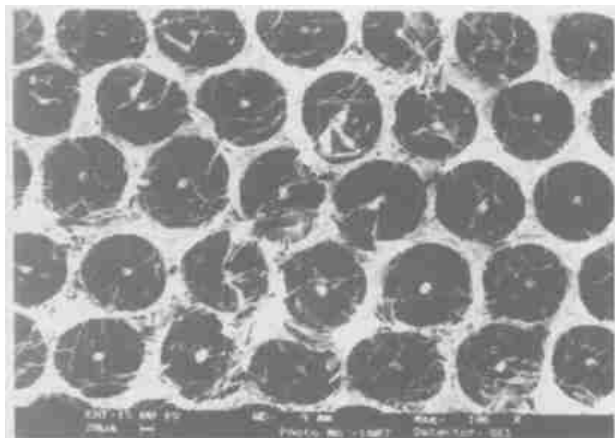


图 5 在  $520$ 、 $70 \text{ MPa}$ 、 $2 \text{ h}$  条件下制备的 B/Al 复合型材拉伸断口形貌  $106 \times$

Fig. 5 Tensile fractograph of B/Al composites ( $520 / 70 \text{ MPa} / 2 \text{ h}$   $106 \times$ )

(下转第 61 页)

由照片可知填丝与不填丝焊缝组织皆正常,无裂纹、夹渣、疏松等缺陷,焊缝组织晶粒细小。

#### 4.5 导管焊缝的气孔抑制<sup>[1~3]</sup>

铝合金导管焊接接头的内部缺陷主要是气孔,而氢是造成气孔的主要原因,在实际工艺中,氢的来源很多,如原材料的含氢量、接头表面污物和氧化膜中的水、焊接环境湿度、保护气中含的氢和水等,因此要完全避免产生气孔比较困难,只能将气孔抑制到一定的程度。

酸洗质量对焊缝气孔的影响非常明显,严格酸洗过程,洗液浓度、温度符合要求,酸洗时间适宜,冲洗彻底,对抑制气孔有很大作用。严格酸洗后的铝合金导管表面总会有一层结合了水的薄氧化膜,焊前对导管端面 and 焊接区进行刮削打磨,对抑制气孔是有利的。采用加填充环的方法,如果焊前无法对其表面进行清理,焊接过程中就会向熔池增氢,增大了焊缝气孔倾向,因此,直接对接的接头形式可减小焊缝气孔倾向。

焊接参数对焊缝气孔也有一定的影响,采用大的焊接电流配合较高的焊接速度对抑制气孔是有利的。

铝导管焊接时必须对环境湿度提出要求,大量试验表明在湿度较大的潮湿天气环境下进行焊接时,气孔问题是难以避免的。随着湿度的降低气孔

倾向逐渐减少。采用直接对接的接头形式,环境湿度大约在 40% 以下时, I 级焊缝气孔合格率可达到 100%。

#### 5 结论

(1) 采用 MK-200 全位置焊管机对铝合金导管焊接必须进行严格的焊前清理,酸洗后平端口,尽可能多地去除接缝处的氧化膜,并且要求焊接环境相对湿度不能高于 40%,这样才能获得良好的焊缝内部质量。

(2) LF6 10 mm 导管采用加填充环的方法,焊缝成形及接头力学性能可达到 QJ 2865—97 I 级焊缝标准, I 级焊缝气孔合格率达到 75% ~ 85%。

(3) LF6 10 mm 导管不加填充环,采用背保护气加压方法改善焊缝成形,焊缝基本无凹陷,金相组织正常,内部质量及接头力学性能均达到 QJ 2865—97 I 级焊缝标准。环境湿度在 40% 以下时, I 级焊缝气孔合格率可达到 100%。

#### 参考文献

- 1 周振丰. 金属熔焊原理及工艺. 北京: 机械工业出版社, 1983: 138 ~ 165
- 2 周敏惠等. 焊接缺陷与对策. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1984: 142 ~ 176
- 3 John E. Hatch 主编, 刘静安等译. 铝的性能及物理冶金. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1990: 13 ~ 15

(上接第 52 页)

观察拉伸断口形貌可以发现,断口比较平齐,呈脆性断裂,没有发生纤维从基体中拔出现象,碳纤维都被基体铝合金牢牢地固结在一起。由此可见,在复合过程中纤维与基体之间产生了紧密接触,界面结合良好。这说明只要工艺参数选择适当,用热等静压法可以制备质量符合要求的 B/Al 复合型材。

#### 4 结论

(1) 采用等离子喷涂法制取 B/Al 复合材料无纬布,以热等静压方法制备 B/Al 复合型材的技术方案切实可行,可一次成型多根形状复杂的常用形式的 B/Al 复合型材。

(2) 用热等静压法制备 B/Al 复合型材时,试验工装对整个试验的成败以及复合材料的质量均有重要影响。

(3) 实验过程中,热等静压工艺参数为温度 510 ~ 520、压力 70 MPa、保温时间 1.5 h ~ 2 h 时可以得到质量、性能良好的 B/Al 复合型材。

#### 参考文献

- 1 冶金工业部金属研究所. 国外纤维增强金属基复合材料的发展. 1973: 6 ~ 25
- 2 张国定, 赵昌正. 金属基复合材料. 上海交通大学出版社, 1996: 26, 175
- 3 曾汉民, 李成功等. 高技术新材料要览. 中国科学技术出版社, 1993: 522, 523, 564, 565
- 4 于琨, 徐洪清等. 硼/铝型材的研制. 见: 第三届全国复合材料学术会议论文集(第三册). 中国力学学会、中国航空学会、中国宇航学会, 1984: 711 ~ 719
- 5 库吉诺夫 B B [苏]. 等离子涂层. 科学出版社, 1981: 169