

B/Al 复合管的研制

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 介绍了蒸气热等静压法制备 B/Al 复合管材的工艺流程,讨论了用该方法制备 B/Al 复合管材的影响因素,如装配工艺、复合工艺等。本试验在温度 (490 ± 10) 、压力 70 MPa、保压时间为 40 min ~ 45 min 的工艺条件下制得了 34 mm \times 1 mm \times 1 020 mm、40 mm \times 1 mm \times 1 020 mm、60 mm \times 1 mm \times 1 200 mm 三种规格的带接头的 B/Al 复合管,并对管的物理性能、力学性能进行了测试,结果表明该工艺方案切实可行,在上述参数下可以制得高质量的 B/Al 复合管。

关键词 B/Al 复合管材,热等静压,力学性能

Research on Boron/ Aluminum Composite Tubes

Zhang Xuhu Hu Xinhua Guan Shengyong Zeng Fanwen Wang Xiang

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

Abstract Fabrication process of boron / aluminum composite tubes with longitudinal reinforcement using vapor isostatic technique is introduced in this paper ,including assembly technique and hot-pressing-bonding methods. Three different size of B/Al composite tubes (34 mm \times 1 mm \times 1 020 mm , 40 mm \times 1 mm \times 1 020 mm , 60 mm \times 1 mm \times 1 200 mm) are manufactured at (490 ± 10) ,under the pressure of 70 MPa for 40 ~ 45 minutes. Physical and mechanical properties of these B/Al tubes are tested ,and the results show that the vapor isostatic technique is practicable and high quality B/Al structural tubes can be successfully manufactured with our parameters.

Key words B/Al tubes ,Hot isostatic pressing ,Mechanical properties

1 前言

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。它具有高的比强度、高的比刚度和独特性能,是航天航空构件的理想候选材料,受到了世界各科技发达国家的高度重视。特别是美国,已具有相当的工业生产规模,如美国联合碳化物公司、麦克唐纳·道格拉斯公司、通用技术公司、阿姆柯公司等都已能批量生产。目前已能制造 610 mm \times 1 830 mm 的板材,2 m 以上的各种型材和管材。

B/Al 复合材料最成功的应用是美国在航天飞

机中机身结构作为主要骨架和肋条桁架的支柱、骨架稳定支架、制动器支撑柱等,采用了不同规格的 243 根 B/Al 复合管,全部 B/Al 复合管质量为 150 kg^[1]。这些复合管桁架结构件,达到了航天飞机实际飞行的全部要求,比最初铝合金挤压件的方案在中机身结构部分,可减轻 145 kg^[1,2],相当于减轻 44 %^[2],并且节省了空间,改善了飞行器内部通道。俄罗斯用 B/Al 复合管研制了可同时放置 3 颗卫星的支架。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^[3]。

收稿日期:2000 - 01 - 10

张绪虎,1966 年出生,工程师,主要从事金属基复合材料的研究工作

宇航材料工艺 2000 年 第 6 期

— 45 —

此外,美国、俄罗斯等国家还在导弹转接壳、仪器框架结构及空间太阳能电池支架等部位应用了大量 B/Al 复合材料。因制作工艺的特殊性,B/Al 复合管的成形工艺,大体上可归结为热等静压法和特种铸造法两类。例如英国 BNF 金属工艺中心用真空渗透加压铸造法,制取了直径 330 mm,高 300 mm 的 B/Al 复合管,估计管壁厚超过 6 mm。美国、俄罗斯则用 B/Al 无纬布,用热等静压法制取了带接头的 B/Al 复合管。对于细长、高纤维体积分密度的复合管,选用热等静压方法较为适宜,也可避免铸造法的高温对纤维可能造成的不良影响。我国对 B/Al 复合材料的研究始于 70 年代,在最近几年取得了长足进步。航天材料及工艺研究所已具备了生产不同规格 B/Al 复合管和型材的能力,其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。

2 实验方法

2.1 材料

增强剂是用化学气相沉积法(CVD)制造的不带

涂层的硼纤维,纤维直径 140 μm ,基体是铝合金。在生产 B/Al 复合材料专用设备上进行纤维缠绕,设备上有特制的滚筒,其尺寸为 550 mm \times 1 054 mm,在滚筒表面上加工有螺距为 0.18 mm 的螺纹,以保证纤维排列均匀。对缠绕好硼纤维的滚筒进行等离子喷涂,使基体铝合金沉积在硼纤维的表面,形成 B/Al 无纬布。

2.2 方法

将 B/Al 无纬布清洗后进行裁剪,在内衬上卷绕、模具装配、充水,而后关闭进水口阀门、加热、蒸气热等静压复合。采用蒸气热等静压技术使复合成本降低,且安全性优于常用的热等静压炉。这种方法的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,在管材的制造过程中,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。复合后去除承压环、半模、内衬,即得到要求的 B/Al 复合管,其工艺流程见图 1。

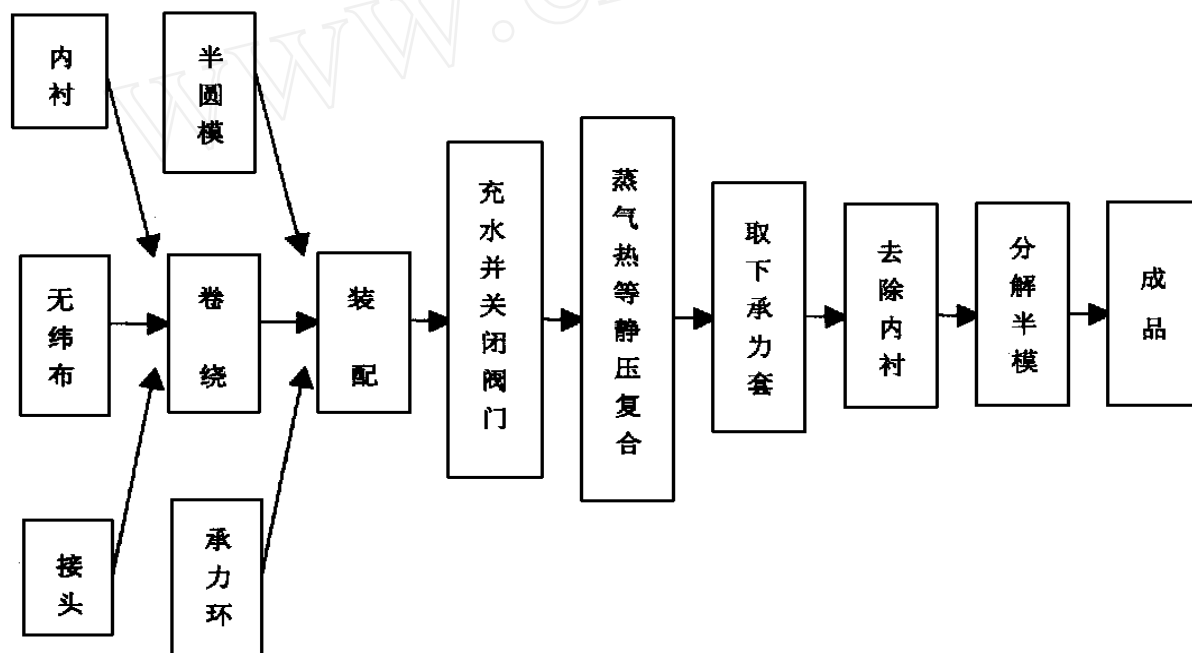


图 1 蒸气热等静压法制备 B/Al 复合管工艺流程图

Fig. 1 Process of fabricating B/Al tubes by vapor isostatic technique

3 结果与讨论

3.1 复合管材尺寸的控制

复合管材的壁厚,主要是取决于无纬布的卷绕数量和铝箔的厚度,而管材的长度需要由模具决定。为了达到对管材径向尺寸的控制目的,本试验采用了固定外径,使内径增大的内压法。外径由圆半模和足够刚性的承力套确定。内衬采用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢,壁厚 0.5 mm,为保证质量必须严格控制内衬的同轴度,同时对密封环的夹紧力要有一定限制,既要保证高温高压下的气密性,又要不使内衬破损。试验结果表明,在复合过程中,内衬具有良好的延性,形成定向的外扩变形,并由此将压力均匀到施加于模套内的 B/Al 无纬布和铝箔迭层上,防止了无纬布在复合过程中的堆积。据此可知半圆模的精确内径即为 B/Al 复合管的外径。

3.2 最佳工艺参数的选择

合理的模具设计及材质处理,保证了管材尺寸的准确性,但还必须与其它工艺参数适当配合,才能制取质量符合要求的复合管。

复合热压过程是整个工艺流程中最重要的工序,控制热压参数——温度、压力、时间和气氛是非常必要的,否则在恶劣的条件下,会使复合管的性能降低。B/Al 复合管的机械性能不但受复合后硼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,如果发生严重的界面反应,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剧烈下降^[4],但是,为了界面粘结,适度存在界面反应物有时是必要的。硼纤维热压过程中氧化控制也是必要的。虽然硼纤维具有较好的高温强度,在 400 °C 时能保持室温强度的 60%~80%,但在超过 400 °C 的空气中暴露时,纤维受到比较严重的氧化^[5],性能也开始减退^[6]。因此,在用无涂层硼纤维制备复合材料时,须用惰性气体保护或在真空环境中。参阅美国制造 B/Al 复合管的工艺条件,本试验在真空状态下采用了逐步加热加压工艺过程,首先把管子毛坯加热到 (490 ± 10) °C,连续加热时间不少于 150 min,在这一加热过程中,使压力逐步上升到 60 MPa~70 MPa 状态下,保持压力 40 min~50 min。试验结果表明,管材压合密实无缺陷,纤维排列规则有序,取得良好的复合效果(见图 2)。本试验制得 34 mm × 1 mm × 1 020

mm、40 mm × 1 mm × 1 020 mm 和 60 mm × 2 mm × 1 200 mm 共三种规格的带接头 B/Al 复合管。

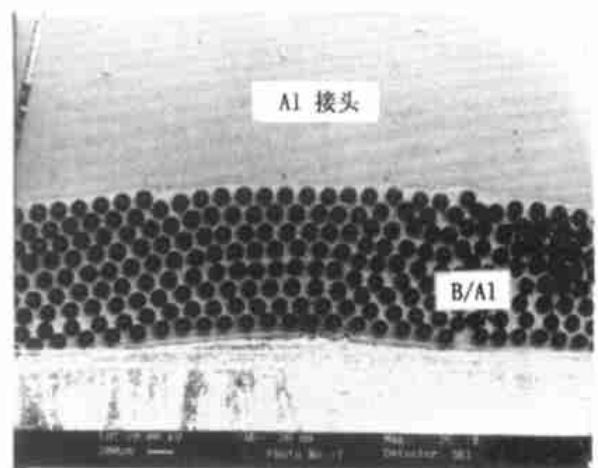


图 2 纤维体积分数为 50% 的 B/Al 复合管接头部位金相组织

Fig. 2 Metallographic structure of B/Al tube in end joint section

3.3 B/Al 复合管性能

复合后的 B/Al 管逐件进行了无损检测,没有发现缺陷,随后又进行了整管的拉伸和压缩试验(见表 1),接头部位没有出现破坏现象。

表 1 B/Al 复合管的整体拉、压试验结果

Tab. 1 Experimental results of B/Al tubes

试样	规格/mm	$F_{拉}/\text{kN}$	$F_{压}/\text{kN}$	备注
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

由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,始终是一个棘手关系,器件设计成败的关键。在上述制管过程中,将 B/Al 插入铝合金接头中达接头的 3/5 长度(接头长 50 mm,插入段 30 mm)。增大了 B/Al 无纬布迭层同金属接头的结合面,从而有效地增大了接头和管材之间的结合力。从表 1 可以看出 60 mm

管材和 40 mm 管材分别在 200 kN、60 kN 的拉压试验中完好无损,证明本试验采用的制管方案切实可行,扩散结合的连接是成功的。

从管材中部取试样进行物理性能和力学性能的测试,B/Al 复合管的物理性能如下:

密度(20) :2 555 kg/ m³

主要增强方向的线膨胀系数:

(- 150 ~ +20)5 ×10⁻⁶ K⁻¹

(- 50 ~ +20)6 ×10⁻⁶ K⁻¹

(+20 ~ +100)8 ×10⁻⁶ K⁻¹

(+20 ~ +200)8 ×10⁻⁶ K⁻¹

在增强纤维径向的线膨胀系数:

(- 150 ~ +20)11.4 ×10⁻⁶ K⁻¹

(- 50 ~ +20)13.5 ×10⁻⁶ K⁻¹

(+20 ~ +100)16 ×10⁻⁶ K⁻¹

(+20 ~ +200)17 ×10⁻⁶ K⁻¹

在纤维增强方向的热导率:

(- 150)26.0 W ·(m ·K)⁻¹

(- 50)38.0 W ·(m ·K)⁻¹

(20)45 W ·(m ·K)⁻¹

(100)45 W ·(m ·K)⁻¹

(200)46 W ·(m ·K)⁻¹

在增强纤维径向的热导率:

(20)38 W ·(m ·K)⁻¹

(100)40 W ·(m ·K)⁻¹

(200)43 W ·(m ·K)⁻¹

比热容 C_p:

(- 100)542 J ·K⁻¹

(- 50)732 J ·K⁻¹

(20)1 000 J ·K⁻¹

(100)1 150 J ·K⁻¹

(200)1 350 J ·K⁻¹

从表 2 可以看出管材室温增强方向的拉伸强度达到了 1 079 MPa,压缩强度达到了 1 180 MPa,模量达到了 255 GPa。

表 2 B/Al 复合管的机械性能

Tab.2 Mechanical properties of B/Al tubes

试验温度 T/	增强方向上 的弹性模量 E/ GPa (静态)	增强纤维 径向弹性 模量 E/ GPa (静态)	剪切模量 / GPa (静态)	泊松 系数	增强方向 拉伸极限 强度/MPa	增强方向 压缩极限 强度/MPa	增强纤维 径向拉伸 极限强度 /MPa	弯曲极限 强度/MPa	横截面内 弯曲极限 强度/MPa	拉伸变形 极限值 / %	压缩变形 极限值 / %
- 196	255	157	50	-	1 079	1 180	69	-	78	0.42	0.46
20	255	157	50	0.23	1 079	1 180	69	1 079	78	0.42	0.46
100	245	147	46	-	1 070	1 128	69	-	78	0.42	0.46
150	235	137	44	-	1 019	1 030	59	-	64	0.42	0.44

B/Al 这类连续纤维增强的金属基复合材料的力学性能主要取决于纤维与基体的性能、界面结合强度、纤维的体积分数及纤维的位向等因素。目前对其理论力学性能预测模型有很多,如混合定则、Rosen^[7]定则和 Zweben^[8]定则等,但这些模型都进行了理想化处理,同实测值有一定的差异,混合定则只反映了最理想的状态,没有考虑纤维本身强度的离

散性,界面特别是界面上生成的脆性化合物、残余应力、基体组织结构等因素,因而是比较粗略的模型。相对而言,后两种模型较混合定则精确,它考虑了界面对复合材料力学性能的影响,但是混合定则比较直观简单。

混合定则为:

$$L = V_f \cdot f_b + (1 - V_f) \cdot m_b$$

$$E_L = V_f E_{fb} + (1 - V_f) E_{mb}$$

式中： E_L ——复合材料纵向拉伸强度；

V_f ——纤维体积分数；

E_{fb} ——纤维力学性能；

E_{mb} ——基体力学性能；

E_L ——复合材料纵向模量；

E_{fb} ——纤维模量；

E_{mb} ——基体模量。

本次试验 B/Al 复合管材所用纤维和基体的力学性能分别为 $E_{fb} = 2\ 500\ \text{MPa} \sim 2\ 800\ \text{MPa}$, $E_{fb} = 400\ \text{GPa}$, $E_{mb} = 333\ \text{MPa}$, $E_{mb} = 70\ \text{GPa}$, 带入公式后可得 $E_L = 1\ 416\ \text{MPa}$ (E_{fb} 取 $2\ 500\ \text{MPa}$), $E_L = 235\ \text{MPa}$, 同实测值相比, 模量比较吻合, 而强度预测值却比实测值相差较大, 但是混合定则仍可大致反映复合管材的力学性能。

4 结论

本研究工作所采用的蒸气热等静压制管方案是可行的, 在热压温度为 (490 ± 10) 、压力 $70\ \text{MPa}$ 、加压时间 $40\ \text{min} \sim 45\ \text{min}$ 的工艺条件下可制得质量符合技术要求的 B/Al 复合管纵向拉伸强度达 $1\ 079\ \text{MPa}$, 压缩强度达 $1\ 180\ \text{MPa}$, 模量达 $255\ \text{GPa}$ 。

参考文献

- 1 Lewis C F. Materials Engineering, 1986:5
- 2 Leisinger M D. Composite struts pare space shuttle weight metal progress. Metal Progress, 1978;113:5
- 3 刘可群. 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
- 4 张绪虎等. 宇航材料工艺, 1998;(3):54~60
- 5 Rizzo H F. In: Boron, synthesis, structure and properties, New York:plenum, 1960:175
- 6 Basche M et al. Fibre Sci. And Tech., 1966:19
- 7 Rosen B W. AIAA Journal, 1964;(2):1985~1991
- 8 Zweben C. AIAA Journal, 1968;(6):60~70

广告征集

经北京市工商行政管理局审查批准,《宇航材料工艺》具有经营广告业务资格。多年来,已承办了国内广告,发布外商来华广告。

本刊国内外公开发行,具有较高的知名度和较广的影响面,拥有发布广告资格的审查员和业务员。

现征集 2001 年封底彩色和封二、封三及插页黑白广告,价格优惠,有意者请速与编辑部联系。

联系人:马晓艳

电话:(010)68383269

广告许可证:京丰工商广字第 0011 号

传真:(010)68383237