

B/Al 复合管材的轴压破坏及力学性能分析

张绪虎 胡欣华 曾凡文 汪翔

(航天材料及工艺研究所 北京 100076)

摘 要 对 B/Al 复合管材进行了整体轴压破坏试验,并对材料基本力学性能进行了测试。结果表明,管材轴压的理论计算值比试验破坏值小得多,平均修正系数达 1.57;管材基本力学性能 拉伸、 $E_{\text{拉伸}}$ 分别达到了 1 130 MPa、228 GPa, 压缩、 $E_{\text{压缩}}$ 达到了 2 510 MPa、243 GPa。对管材破坏模式的研究认为,为了提高管子的压缩破坏载荷,必须减小管子与接头处的应力集中,改进管子的成型工艺,尽力消除管子成型模具接缝处的薄弱区。

关键词 B/Al 复合管,轴压,力学性能,破坏模式

Axial Compress Test of B/Al Tubes and Mechanical Property Analysis

Zhang Xuhu Hu Xinhua Zeng Fanwen Wang Xiang

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

Abstract Axial compress destructive tests of B/Al tubes are performed and their basic mechanical properties are measured. Test results show that theoretical calculating data of the axial compress properties of tubes are much lower than that of the real test results, and an average coefficient of 1.57 is needed to correct the calculating results. Tensile strength and modulus of the B/Al tubes can reach 1 130 MPa and 228 GPa, and compressive strength and modulus reach 2 510 MPa and 243 GPa average on. In order to increase the compressive strength of the tube, stress concentration in tube ends and joints has to be decreased and processing technology has to be improved to eliminate weak area resulted from tube mold gaps.

Key words B/Al tube, Axial compress, Mechanical property, Rupture model

1 前言

由于 B/Al 复合材料具有高比强度、比模量和好的耐热性,在航天航空领域里具有十分重要的作用。到目前为至,B/Al 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(MMC)。国际上(主要是美国和俄罗斯)已从实验室研究阶段进入了实际工程试验应用阶段,并已在航空航天的各种飞行器上进行了广泛的应用试验。如美国在航天飞机机身上采用碳纤维增强 6061 铝合金制成的带 Ti - 6Al - 4V 合金端环与端接头的 B/Al 管,制作了主要骨

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,每架安装了 243 根这样的 B/Al 管构件,全部 B/Al 管质量为 150 kg。这些复合材料管桁架构件,达到了航天飞机实际飞行的全部性能要求,在中机身结构部分,与最初铝合金挤压件相比,可减重 145 kg,相当于质量减轻 44%^[1]。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都处于世界领先地位。俄罗斯用 B/Al 复合管研制出了可同时放置 3 颗卫星的支架,此结构若用钛合金,需 150 kg ~ 160 kg,而用 B/Al

收稿日期:2000 - 04 - 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

为 100 kg,结构热稳定性好,并且取得了明显的减重效果^[2]。我国对 B/Al 复合材料的研究,投入了很大的人力、物力。航天材料及工艺研究所近年成功地研制出了不同规格的 B/Al 复合管,为配合工艺技术的研究和开发应用,进行了整管压缩破坏试验和基本力学性能测试,并对管材破坏模式及试样断口进行了研究。

2 实验

2.1 材料

增强体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 5056(LF6)铝合金。复合管在蒸气等静压设备上复合而成,尺寸为 20 mm × 1 mm × 566 mm,两端带有 5056 铝合金接头,纤维体积分数达 50%,管子几何参数见图 1。

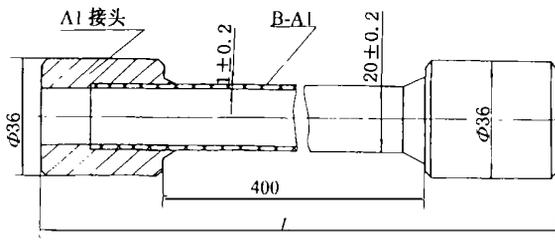


图 1 管子几何参数

Fig. 1 Dimensions of tube

2.2 实验方法

管材压缩破坏试验在岛津 DSS-25T 电子万能试验机上进行,使用 25 t 载荷管进行载荷的测量,记录并绘制载荷—变形曲线。每个复合管按要求在中部对称贴应变片后,使用 Y-22 型静态应变测量仪测量不同载荷下的应变值。压缩试验加载速度为 0.5 mm/min ~ 1 mm/min。

对 B/Al 复合管基本力学性能主要测试了拉、压强度和模量。由于目前只有美国材料试验协会在 1977 年颁布了 ASTM D3552-77《纤维增强金属基复合材料拉伸性能试验方法》。除此之外,国内外均无金属基复合材料力学性能测试方法标准,因而本试验参考这一试验方法,将管子沿轴向剖开,取其弧段按平板试样加工,自行设计了带圆弧的加强片,其圆弧半径与管材内径或外径一致。采用 J-47A 胶膜进行粘接,并经 120 / 3 h 固化。试样拉伸速度为 2.0 mm/min ~ 5.0 mm/min,压缩速度为 2.0 mm/min

~ 3.0 mm/min。

3 试验结果及分析

偏心加力相当于给管子增加一个附加弯矩,会使管材承载能力下降。本试验采用了调偏装置,使管子的弯曲中心与试验机的加力中心尽量重合得好一些,以便使附加弯矩减少到最小。为达到调整加力中心,先对管材施加预紧力,使管材中部同一截面处的各应变值基本相等后,再继续加压,直至破坏。该装置是在加力的刀口上增加一个圆环,在圆环四周相互垂直的四个象限处增加四个调节螺钉,以此来调整管子的加力中心。每根管子的尺寸及破坏载荷见表 1。

本次试验共对 6 根管子进行了两种状态轴压破坏试验。第一种状态,加载两端的刀口平行,相当于两端简支边界,管子发生屈曲变形时其最大载荷为 T_1 。第二种状态,加载两端的刀口相互垂直,这种边界条件,相当于一端简支,另一端固定,管子破坏时其载荷为 T_2 。管子的临界轴压理论值可以用欧拉公式计算:

$$T_3 = \frac{2 E_I}{(\mu L)^2}$$

式中 μ 为长度系数,两端简支取 $\mu = 1$; E_I 为管子弯曲刚度; L 为管子有效长度。

为了进行统计分析,引入了试验修正系数

$$= \frac{T_1}{T_3}$$

表 1 管子临界轴压试验结果、理论计算及试验修正

Tab. 1 Ultimate axial compressive strength and theoretical calculating results and correction coefficient

| 试管编号 | 管子长度 / mm | 外径 d / mm | 壁厚 / mm | T_1 / kN | T_2 / kN | T_3 / kN | 修正系数 |
|------|-----------|-------------|---------|------------|------------|------------|------|
| 1 | 565.8 | 20.33 | 1.08 | 46.5 | 50.3 | 25.07 | 1.85 |
| 2 | 567.9 | 20.35 | 1.014 | 31.6 | - | 22.89 | 1.34 |
| 3 | 565.7 | 20.40 | 1.14 | 42.5 | 67.8 | 25.73 | 1.62 |
| 4 | 565.7 | 20.36 | 1.155 | 30.8 | 56.8 | 25.65 | 1.20 |
| 5 | 565.7 | 20.40 | 1.22 | 48.2 | 74.6 | 29.47 | 1.64 |
| 6 | 566.0 | 20.42 | 1.09 | 50.0 | - | 28.31 | 1.77 |

* T_1 统计结果 $\bar{X} = 41.6$, $C_n = 20\%$; 的统计结果 $\bar{X} = 1.57$, $C_n = 16\%$ 。

对表 1 轴压破坏试验修正系数进行统计分析,其平均值 $\bar{X} = 41.6$, $C_n = 20\%$ 。修正系数远大于 1,分析认为主要原因是两端边界没有达到严格的简支要求,一种可能是两刀口的平行度不够,另一种可能是刀口处摩擦力大。在同一批次的管子中切取拉伸、压缩试样,测试结果见表 2。

表 2 管材 0 拉伸、压缩性能

Tab.2 Tensile strength and compressive strength of tubes[0]

| 试样 编号 | E_t / GPa | E_c / GPa | t / % | c / % | t / MPa | c / MPa | μ_t |
|-----------|----------------|----------------|------------|------------|--------------|--------------|---------|
| 1 | 218 | 260 | 0.559 | 1.22 | 1 210 | 3 180 | 0.198 |
| 2 | 224 | 252 | 0.517 | 1.11 | 1 140 | 2 510 | 0.196 |
| 3 | 225 | 259 | 0.511 | - | 1 120 | - | 0.222 |
| 4 | 227 | 209 | 0.585 | 1.11 | 1 270 | 2 170 | 0.197 |
| 5 | 247 | 235 | - | 0.875 | 1 020 | 2 180 | 0.234 |
| 6 | 225 | - | 0.395 | - | 1 040 | - | 0.214 |
| \bar{X} | 228 | 243 | 0.505 | 1.08 | 1 130 | 2 510 | 0.210 |
| S | 10 | 21 | 0.068 | 0.15 | 96 | 470 | 0.015 |
| C/ % | 4.4 | 8.6 | 13 | 14 | 8.5 | 19 | 7.1 |

从表 2 可看出平均拉伸强度达 1 130 MPa,离差率控制在了 10% 以内。平均压缩强度达 2 510 MPa,虽然离差较大,但最低压缩强度也在 2 100 MPa 以上。从这些数据可以看出本试验采用的 B/Al 复合管复合质量较好。图 2、图 3 分别是拉伸试样金相组织和断口。从图 2 可以看出,复合材料压合密实,无缺陷,纤维排列规则有序。从图 3 可见,断口是混合断裂模型(M-fracture),既有累积断裂(C-fracture),也有非累积断裂(Nc-fracture)。部分区域有纤维拔出,而断口另外的区域没有纤维拔出,呈平断型。这说明复合效果良好,界面结合强度适中。

文献[3]研究表明,平断型断口对应较高的界面结合强度,拔出型断口对应于较弱的界面强度。理论分析认为,在外力作用下,复合材料首先在强度较低的铝基体及纤维的部分薄弱环节上产生微裂纹,当铝基体上的微裂纹扩展到 B/Al 界面处,有可能出现两种情况。若界面结合较强,裂纹尖端的应力集中足以使纤维断裂,则裂纹通过纤维向前扩展,如此

则形成平断型断口。若界面结合较弱,则当裂纹尖端到达 B/Al 界面处时,将使界面脱粘,裂纹沿纤维表面纵向扩展,一直到达纤维较薄弱处或存在微裂纹处,实现各处微裂纹的贯通,这样则形成拔出型断口。以累积断裂或非累积断裂方式断裂的复合材料的力学性能都不会很好。只有界面结合适中,以混合断裂模式断裂的复合材料才会有较好的力学性能。从断口形貌观察,也说明本试验 B/Al 复合管的复合效果良好,界面结合强度适中。进一步观察还可发现硼纤维的断口形貌多数呈锥状断口,同时还有少许平型断口和破碎断口,这可能同纤维本身的缺陷不同有关,但从轴压破坏试验所观察到的破坏现象分析,管子结构有两个薄弱区,一是管子与铝接头的连接处存在较大的应力集中,二是管子成形模的接缝处形成一个强度的薄弱区,致使管子的压缩破坏均出现在这两个区域,见图 4,这说明管子的结构及成型工艺仍有待改进。

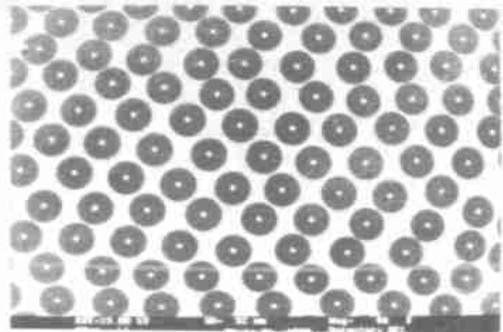


图 2 拉伸试样金相组织

Fig.2 Metallograph of B/Al composite

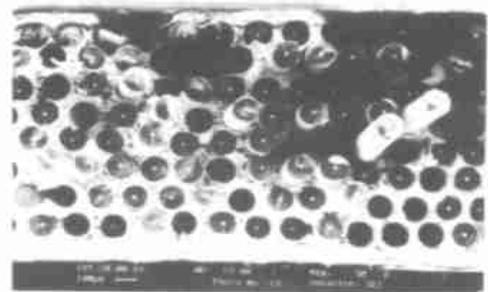


图 3 拉伸试样断口

Fig.3 Fracture Microstructure of Tensile sample

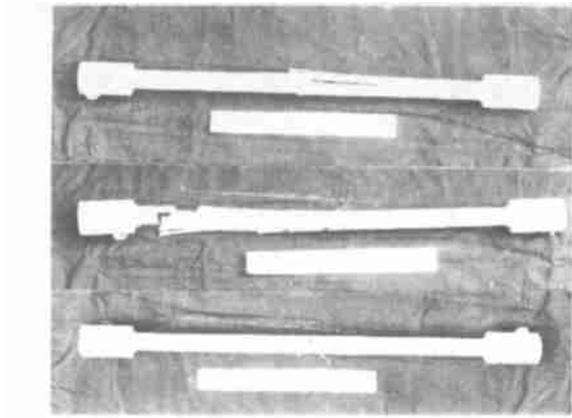


图4 管子压缩后的破坏模式

Fig.4 Rupture model of compressive test tube

4 结论

(1) B/Al 复合管的轴压理论值比试验破坏值小得多。管材的基本力学性能则达到了:

$\sigma_t = 1\ 130\ \text{MPa}$, $\sigma_c = 2\ 510\ \text{MPa}$; $E_t = 228\ \text{GPa}$, $E_c = 243\ \text{GPa}$ 。

(2) 拉伸断口呈混合断裂模型,说明复合效果良好,界面的结合强度适中。

(3) 对管材破坏模式的研究认为,管子与接头连接处及管子成型时形成的接缝处是轴压破坏的薄弱区。

参考文献

- 1 Weisinger M D. Composite struts pave space shuttle weight. Metal Progress, 1978;113(5):60
- 2 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
- 3 Herring H W, Lytton J L, Steele J H. Experimental observation of tensile fracture in unidirectional boron filament reinforced aluminum sheet. Metallurgical Transaction, 1973;4(3):807~817

· 会议信息 ·

2001 年 航天材料及应用 航 天 工 艺 专业信息网学术交流会 在江西九江召开

2001 年航天材料及其应用专业信息网(13 网)和航天工艺专业信息网(14 网)联合会议于 2001 年 9 月 4 日至 8 日在江西省九江市召开。与会代表来自航天科技集团公司、机电集团公司、中科院和第二炮兵等 33 个单位,共 82 人。会议由北京空间机电研究所主办,航天工艺专业信息网网长北京空间机电研究所王石麟副总工艺师主持会议,航天科技集团公司工艺专家组成员、航天材料及工艺研究所顾兆旃副总工程师致开幕词。会议共征集到 80 篇论文,并编辑为《2001 年航天工艺、航天材料及其应用学术研讨会》论文集,其中大会交流了 13 篇,其余的论文进行了分组交流。会议讨论气氛热烈,学术气氛浓厚,突出了多(论文多、参会人员多)、实(反映了科研生产中的实际问题)、新(反映了当前航天领域材料、工艺研究的新动向、新成果)的特点,是一次成功的学术交流活动,达到了交流的目的,大会获得了圆满成功。

中国航天科技集团公司 航天材料及应用
航 天 工 艺 专业信息网