第 11 卷 第 4 期 复 合 材 料 学 报 Vol. 11 No. 4
1994 年 12 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Dec. 1994

碳纤维增强铝合金层压材料的研究①

周建国 胡福增 吴叙勤
(华东理工大学材料科学研究所,上海 200237)

摘 要 本文探索了碳纤维增强铝合金层压材料(CFALL)的制备工艺,并制得了具有优异力学性能、耐温、耐疲劳的层压材料。就纤维含量、纤维取向及温度等对层压材料力学性能的影响作了探讨,并对它的疲劳性能以及预应变对疲劳性能的影响进行了研究。试验表明,CFALL 具有轻质、高强、耐温、耐疲劳等特点,它的拉伸、弯曲强度超过了 ARALL 和 GLALL,它的疲劳性能与 ARALL 相近。

关键词 C/Al/环氧层压板,制备工艺, 力学性能,疲劳性能

1 引 言

纤维增强铝合金层压板是近年来出现的一类新 型结构复合材料。

荷兰 Delft 技术大学航空工程系、Fokker 飞机公司、荷兰国家宇航实验室、ENKA 公司、3M 公司和 Alcoa 公司合作在七十年代末首先研制成功了 Kevlar 纤维增强的铝合金层压材料(ARALL)[1],它们的研究表明,ARALL 具有优良的力学性能,它既保留了纤维增强塑料比强度高、耐疲劳等优良性能,又具有金属材料良好的抗冲击性、机械加工性和固定性。现已有四种 ARALL 产品,分别具有高强度、高韧性、耐高温等特点[2],并已运用于飞机结构中进行飞行试验[3]。预计在九十年代,将与铝合金、纤维增强塑料一起,成为航空、航天用的主要结构材料。

由于碳纤维具有优异的力学性能,可以预计用碳纤维替代 Kevlar 纤维来制作层压材料也将具有 ARALL 的特点。目前国内已有厂家生产性能优异的碳纤维预浸带,这为碳纤维增强铝合金层压材料(CFALL)的工业化生产提供了必要条件。

玻璃纤维增强铝合金层压材料(GLALL)也在研制过程之中[4],尽管它的力学性能比 ARALL 差,但由于成本较低,所以仍然具有一定的应用前景。

本文研究了制备 CFALL 的工艺,对其力学性能以及影响力学性能的因素作了探讨,并把 CFALL 与 ARALL、GLALL 的力学性能加以比较。

2 实验方法

2.1 原材料

碳纤维(T300)	上海碳素厂	铝合金($LY_{12}CZ$)	上海飞机制造厂
环氧树脂(AG-80)	上海合成树脂所	固化剂(DDS)	上海试剂三厂

① 本文 1993 年 5 月 7 日收到

2.2 样品制备

2.2.1 铝合金表面处理

本文采用磷酸阳极化来处理铝合金，其处理工艺如下：

脱脂→碱洗→水洗 1→酸蚀→水洗 2→磷酸阳极化→水洗 3→烘干→待用

2.2.2 胶粘剂配方

环氧树脂 AG-80　100；　固化剂(DDS)　25；　抗沉淀剂等　少量

2.2.3 CFALL 的制造工艺流程

将碳纤维熔融浸胶，制得预浸带，并将制得的预浸带与经表面处理的铝合金叠层热压，即制得 CFALL。

2.3 性能测试

1. 根据 GB5259-85 测定胶粘剂的凝胶时间。

2. 拉伸强度、弯曲强度和层间剪切强度，分别按 GB3354-82、GB3356-82 和 GB3357-82，在日本岛津 AG-2000A 万能试验机上进行，加载速度为 2mm/min。

3. 冲击强度按照 GB2106-80，在国产 WPM 冲击试验机上进行。

4. 疲劳性能按照 GB3075-82，在国产 10 吨高频程序控制疲劳试验机上，以 100～130Hz 的振荡频率，0.1 的应力比进行。

3 实验结果与讨论

3.1 环氧胶粘剂固化工艺的确定及层板制备

根据有关文献介绍[5]，用 DDS 作为环氧树脂(如 AG-80)固化剂，需要在 180℃下才能充分固化，且配比以 100 份树脂对 25～30 份 DDS 为宜。为使层压材料在固化过程中不致流胶太多，且又具有良好的粘接效果，在固化过程中还需在 130℃左右下保温。

为确定固化工艺，须首先测定在 130℃左右下和 180℃下保温时间以及固化后的固化度。

对胶粘剂进行凝胶时间测定，得到在 130℃时，90 分钟以后胶粘剂可以开始拉丝，为此确定了 130℃时需保温 90 分钟。

为确定 180℃下的保温时间，分别测定了在 180℃下保温 1hr，2hr，3hr 试样的搭接强度结果，见表 1。

表 1　保温时间对搭接强度的影响

保温时间	180℃×1hr	180℃×2hr	180℃×3hr
搭接强度(MPa)	13.5　13.1　18.2	17.9　19.0　18.2	18.5　18.5　18.6
平均搭接强度(MPa)	14.9	18.4	18.5

由表 1 可以得到，随着保温时间的增加，搭接强度提高。但当保温时间在 2hr 以上时，其搭接强度变化不大。

环氧胶粘剂经 130℃×1.5hr＋180℃×2hr 固化后，测得的固化值为 91.4%，说明已基本上达到固化要求。

通过以上试验，可以确定用 DDS 固化 AG-80 环氧胶粘剂的固化工艺如下：

层压材料 $\xrightarrow{\text{升温}}$ 130℃×1.5hr $\xrightarrow{\text{加压 0.6MPa}}$ 180℃×2hr $\xrightarrow{\text{逐步冷却至温度<65℃}}$ 脱模

根据以上固化工艺制得的层压板如图 1 所示。

3.2 CFALL 的拉伸性能及纤维含量、纤维方向、温度对 CFALL 拉伸性能的影响

3.2.1 几种层压材料的拉伸性能

CFALL 的拉伸性能如表 2 所示。表 2 中还列出了 ARALL、GLALL、铝合金以及国内其它科研单位研制的 CFALL 的拉伸性能[1,4,6]，以资比较。

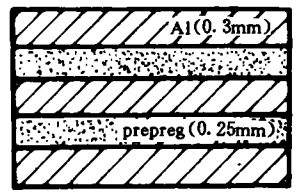

图 1 层压板截面示意图

表 2 几种层压材料拉伸性能的比较

性 能	CFALL*	ARALL	GLALL	CFALL(文献)	Al
拉伸强度(MPa)	840	700	478	790	415
杨氏模量(GPa)	82.9	70.0	58.2	--	67.6
密 度(kg/m^3)	2390	2450	2350	--	2690

* 这里 CFALL 中碳纤维含量为 21%

从表 2 中可知，纤维的性能决定了层压板的拉伸性能。从玻璃纤维、芳纶纤维到碳纤维，随着纤维强度的提高，其层压材料的拉伸强度也提高。

从表 2 中还可以看到，CFALL 的拉伸性能已超过了国外的 ARALL，其拉伸强度和杨氏模量分别比 ARALL 提高了 19%和 18%，且密度与 ARALL($\rho=2450kg/m^3$)相近。证明了用碳纤维制备层压板也同样具有优异的力学性能。

如从理论上对 CFALL 的强度加以计算，则可用如下计算式表示：

$$\sigma_C = \sigma_F V_F + \sigma_M V_M$$

其中：σ_C 为 *CFALL* 的理论强度。

σ_F 为纤维的强度，V_F 为碳纤维的体积含量。

σ_M 为铝合金在应变为 1.5%时的应力，V_M 为铝合金的体积含量。

式中忽略了树脂的强度，因其相对于纤维和铝合金，强度要低得多。

从铝合金的 σ-ε 曲线可以估算出应变为 1.5%时，铝合金的应力为 400MPa 左右，所以 CFALL 的理论强度为：

$$\sigma_C = 3600 \times 0.21 + 400 \times 0.64 = 1012(MPa)$$

由此可以得到，CFALL 的实验值相对于理论值低约 17%，这主要是由于纤维强度不均匀所致。Rosen 确定了复合材料强度同纤维强度变差系数的函数关系[7]，见图 2。按照这一理论，可以看到当纤维强度变差系数为 20%时，复合材料的强度降低 35%左右。由此可以得到如下结论，CFALL 的力学性能已接近其强度极限，这反过来也证实了此一材料的制备工艺较为合理。

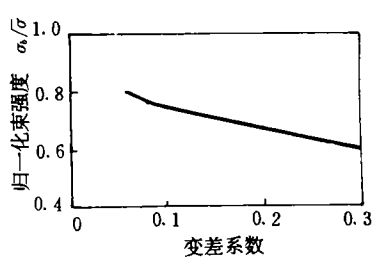

图 2 束强度同纤维强度变差系数的关系

3.2.2 纤维含量对 CFALL 拉伸强度的影响

CFALL 之所以具有优异的拉伸性能，主要是由于纤维的增强作用。图 3 表示了纤维含量对

CFALL 拉伸强度的影响。

从图 3 可以看到,随着纤维含量的增加,材料的拉伸强度提高。当纤维含量为 25%时,其强度可达 910MPa。

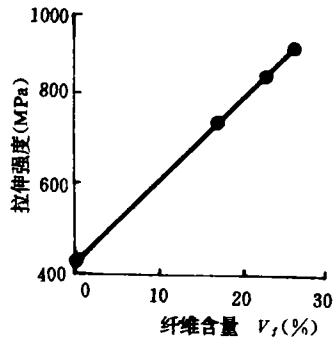

图 3　纤维含量对拉伸强度的影响

3.2.3　纤维方向对 CFALL 拉伸强度的影响

表 3 表示了纤维铺层方向对材料拉伸强度的影响。从表 3 可见,随着纵向纤维的减少,材料的强度下降。

3.2.4　温度对材料拉伸性能的影响

CFALL 的拉伸强度随温度的变化规律如图 4 所示。图中还表示了国外对 2024-T3 铝合金以及用 PEEK 改性 ARALL 的热特性曲线[8]。

从图中可以看出,所有三种材料的拉伸强度都随温度的提高而下降。用热塑性 PEEK 改性的 ARALL 在温度为 225℃时,其拉伸强度下降了 26%,而 CFALL 在温度为 250℃时,其强度仅下降 19%。性能下降主要有两个原因,第一是由于铝合金在温度 100℃以上时,其性能下降较大[8],从图中也可以看出这一点;第二是由于胶粘剂在较高温度下性能下降,从而使材料的分层趋势增加。AF163 环氧粘结剂的使用温度为 150℃,而 AG-80 环氧树脂的使用温度可达 200℃以上,这就说明了 CFALL 具有较好的耐热性能,所以要提高这类材料的耐热性能主要有两条途径,选用高温性能良好的粘结剂和使用温度较高的铝合金,甚至是钛合金。

表 3　纤维方向对 CFALL 拉伸强度的影响

纤维方向	σ_b(MPa)	E(GPa)
纵向(0°)	840	82.9
纵横向(0°与 90°叠加)	510	63.8
交叉斜向(45°)	320	47.9
横向(90°)	300	48.0

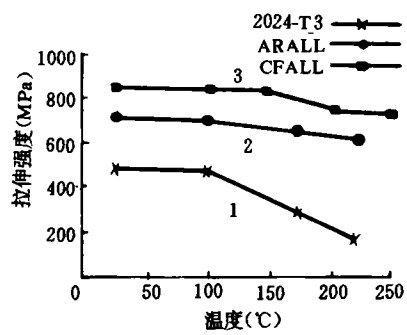

图 4　几种材料的热特性曲线

3.3　弯曲性能、层间剪切性能及冲击性能

分别对 CFALL 的弯曲强度、弯曲模量、层间剪切强度和冲击强度进行了测试,测试结果如表 4 所示。表 4 还列出了国内外研究的 ARALL 以及铝合金、GLALL 的试验数据[1,4]。

从表 4 中可以看到,CFALL 具有非常优异的弯曲强度和弯曲模量。它的弯曲强度和模量相对于 ARALL 分别提高了 12%和 74%。相对于铝合金提高更为明显,分别是铝合金的 1.4 倍和 2.2 倍。

CFALL 之所以具有很高的弯曲强度和模量,是由于选用了高性能的碳纤维以及适当增加了 CFALL 中纤维的含量。在 CFALL 中纤维的含量为 21%,而 ARALL 中纤维的含量为

13%。

表 4 几种材料的弯曲性能、层间剪切性能及冲击性能的比较

材 料	弯曲强度 (MPa)	弯曲模量 (GPa)	层剪强度 (MPa)	冲击强度 (kJ/m²)
CFALL	970	72.0	22.5	140
ARALL	863	41.4	32.1	528
GLALL	869	44.9	41.9	475
Al	683	32.4	51.7	709

从表 4 也可以看到，CFALL 的层剪强度和冲击强度较低，这主要是因为碳纤维抗冲击性能较 Kevlar 纤维、玻璃纤维差，从而使 CFALL 的冲击强度较差。

3.4 疲劳性能

3.4.1 CFALL 的 S-N 曲线

由于层压材料具有优异的抗疲劳性能，所以对 CFALL 的疲劳性能作较为系统的研究尤为重要。对 CFALL 的疲劳性能进行了试验，得到如图 5 所示的 S-N 曲线。

从图 5 可以得到，其疲劳极限（$N=5\times10^6$）为 147MPa，而由资料查得的铝合金疲劳极限为 105MPa，即疲劳强度比铝合金提高了 38%。据文献报道[9]，ARALL 的疲劳极限为 130～180MPa，这与本文研究的 CFALL 的疲劳极限相近，说明 CFALL 也具有 ARALL 优异的疲劳性能。碳纤维具有很高的模量，其拉伸应变较小，从而使 CFALL 中铝合金板的应变量很小，所受的疲劳应力降低，因 CFALL 的疲劳破坏主要是由于铝合金板的破坏，降低了铝合金所受的疲劳应力，故而使 CFALL 的抗疲劳性能显著提高。

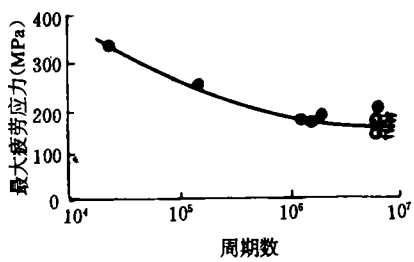

图 5 CFALL 的 S-N 曲线

3.4.2 预应变对材料疲劳性能的影响

根据 CFALL 的 S-N 曲线（图 5），本文确定了适当的试验条件来研究预应变对材料疲劳性能的影响，具体条件为：

最大应力 $S_{max}=0.3\sigma_b=252$MPa，振荡频率 $f=130$Hz，应力比 $R=0.1$

在此应力水平下，分别在不同的预应变下对疲劳寿命进行试验，结果如图 6 所示。

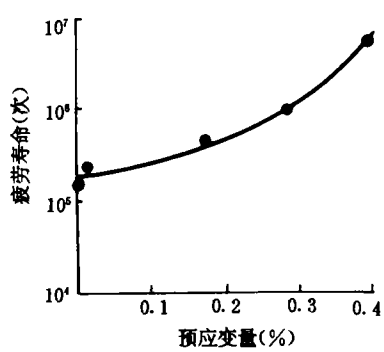

图 6 预应变对疲劳寿命的影响

从图 6 可以看到，随预应变量的增加，材料的疲劳寿命显著增加。当预应变量为 0.380 时，

其疲劳寿命比未经预应变的CFALL提高近50倍。这主要是由于CFALL在制备过程中,由于碳纤维的线膨胀系数($3\sim5\times10^{-6}/℃$)与铝合金($23\times10^{-6}/℃$)存在很大的差异,使制得的CFALL中铝合金受张应力,而碳纤维受压应力,这种应力分布显然不利于充分体现该材料优异的疲劳性能。当对材料施加预应变后,使铝合金板发生塑性变形而受压应力,而碳纤维只是发生弹性变形而受张力,这种应力分布使材料在受外应力作用时,铝合金板所受的应力相对于未经预应变处理的材料中铝合金板所受的应力来说要小得多,从而使疲劳寿命大大增加。

4 结　论

1　本文探讨了制备碳纤维增强铝合金层压材料(CFALL)的制备工艺,确定了制备工艺为:130℃保温90分钟,然后加压0.6MPa并升温至180℃保温2小时。经以上工艺制得的CFALL中,环氧树脂的固化度为91.4%。

2　CFALL具有非常优异的力学性能,其拉伸强度为840MPa,杨氏模量为82.9GPa,弯曲强度为970MPa,弯曲模量为72.0GPa,这使它很有可能成为航天航空领域中的结构材料。

3　纤维含量、纤维方向对CFALL的拉伸强度有很大影响。随着纤维含量的增加,材料的拉伸强度增加。且材料的拉伸强度随纵向纤维量的减小而减小。

4　CFALL具有优异的疲劳性能,其疲劳极限比铝合金提高了38%,与ARALL相近。预应变量对CFALL的疲劳性能有很大影响。当预应变量为0.380%时,其疲劳寿命可增加近50倍。

5　CFALL具有优异的耐热性能,在温度达250℃时仍能保持其室温拉伸强度的81%。

在本文的研究工作中,上海飞机制造厂中试室的陆慧芬同志以及上海钢研.所测试中心的王承忠等同志提供了许多帮助,在此深表谢意。

参 考 文 献

1　Marissen R, *et al*. Development of a new hybrid material: ARALL. Intercon SAMPE Mtg, Cannes, Jan. 1981

2　Vogelesang L B, *et al*. ARALL laminates developments. Proc ICCM Ⅵ, 1989; 3: 519

3　Cunnink J W. Aerospace ARALL—The advancement in aircraft materials. 35th International SAMPE Symposium, 1990

4　苏波,唐羽章. Al/FRP层间超混杂复合材料的力学性能. 玻璃钢/复合材料,1988;(1)

5　德尔蒙特J著. 碳纤维和石墨纤维复合材料技术. Van Nostrand Reinhold Company, 1981

6　胡廷永等. 碳纤维/铝/环氧复合板的初步研究. 复合材料学报,1992;9(4):69—76

7　肯尼思G克雷德主编. 金属基复合材料,国防工业出版社

8　Laubsch Kenneth L. Elevated Temperature Tensile Response of Aluminium-Thermoplastic Lamina Hybrid Composite. Proc ICCM Ⅵ, 1989; 1: 579

9　Johnson W S. Impact and residual fatigue behavior of ARALL and AS6/5245 composite materials. STAR, N87-11848

INVESTIGATION OF CARBON FIBER REINFORCED ALUMINIUM LAMINATE

Zhou Jianguo Hu Fuzeng Wu Xuqin
(Institute of Materials Science, East China University of Science & Technology)

Abstract The fabricating processing of carbon fiber reinforced aluminium laminate (CFALL) has been investigated. With the technique, the laminate with excellent mechanical properties, high temperature resistance and fatigue property has been obtained. The effect of the volume fraction and direction of carbon fiber, and temperature on the mechanical properties of CFALL was also researched. The further detail of fatigue and the effect of prestraining on the fatigue of CFALL was also carried out. The results show that CFALL is characterized by low density, high strength, high temperature resistance and excellent fatigue property. The tensile and flexure strength of CFALL are higher than the corresponding values of ARALL and GLALL, and the fatigue property of CFALL is comparable with that of ARALL.

Key words carbon fiber reinforced aluminium laminate, fabrication technique, mechanical properties, fatigue