

作为飞机的结构材料。

ARALL—未来飞机的结构材料

国防科技大学材料科学系 苏 波 唐羽章

一、前 言

复合材料应用在飞机结构上的比例越来越大,除了象碳/环氧、芳纶/环氧等高级结构复合材料外,一些新型的结构材料仍不断地涌现。最近,由荷兰Delft技术学院宇航工程系与欧洲Fokker飞机公司、荷兰国家宇航实验室(NLR)、荷兰ENKA公司(芳纶厂商)、美国3M公司(树脂厂商)和ALCOA公司(铝合金厂商)合作,成功地研制出了一种新型的结构复合材料——铝/芳纶-环氧层合材料(Aramid Aluminum Laminate,简称ARALL)。这种材料是由铝合金板与芳纶-环氧单向复合材料通过特殊的工艺(加预应力或预应变)和铺层设计热压而成的层合材料(见图1)。它既不同于金属基复合材料,也不完全属于聚合物基复合材料,可视为一种金属/非金属层间超混杂复合材料。

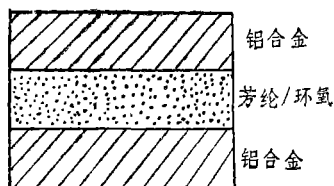


图1 ARALL材料的结构示意图

ARALL材料具有比单独的铝合金和芳纶-环氧复合材料更优异的性能。它除了具有高的比强度和比模量外,最突出的优点就是具有优异的耐疲劳性能。此外,它还保留了金属材料的许多优点,如良好的塑性、抗冲击性能、耐闪电性、易加工性等。因而,它特别适合于

二、ARALL材料的特点

1. 力学性能和物理性能

表1列出了ARALL材料和铝合金的性能比较。由表1可以看出,由于ARALL中含有芳纶-环氧复合材料,其比强度和比模量与铝合金相比均高,特别是比强度。但是,其延伸率比铝合金的小。

表1 ARALL和铝合金的性能比较

性能项目	ARALL	铝合金(2024-T3)
拉伸强度, MPa	700	470
弹性模量, MPa	70000	72000
延伸率, %	2.4	17
密度 ρ , kg/m ³	2450	2800
热膨胀系数, $\times 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$	17	23
比强度, MPa/p	0.29	0.17
比模量, MPa/p	29	26

2. 耐疲劳性能

实验表明,ARALL与铝合金相比具有突出的耐疲劳性能(图2),特别是当在ARALL中引入适当的预应变时(图3)。由开孔引发的裂纹在扩展一段很小的距离后,很快被抑制,或进展得很缓慢。这种优异的耐疲劳性能可以归功于芳纶,即使对非常小的裂纹,在裂纹端部的纤维均有很好的阻止裂纹扩展的能

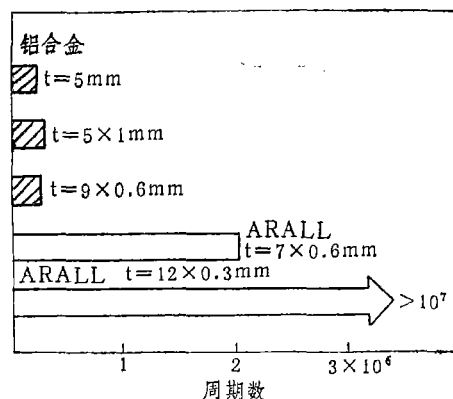


图2 ARALL和铝合金疲劳寿命的比较

力, 只要纤维本身不发生破坏, 就一直具有这种能力。

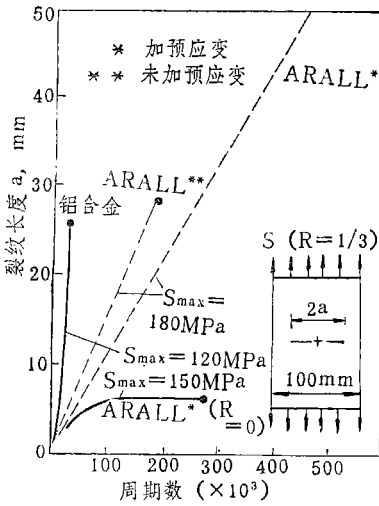


图 3 等振幅下的裂纹扩展寿命

3. 剩余强度

断裂韧性是表征材料在疲劳裂纹或其他缺陷存在时抵抗迅速断裂能力的参数。由图 4 可以看出, 具有疲劳裂纹的 ARALL 材料的断裂韧性优于铝合金, 这是由于裂纹尖端的完整纤维和裂纹周围存在脱粘区的结果。但是带有缺口的 ARALL 与铝合金相比, 其断裂韧性差不多, 甚至更差一些。对带有钝缺口的 ARALL 材料的静态破坏实验表明, 就静态强度而言, ARALL 对缺口比较敏感, 这主要是由于高模量的芳纶破坏应变低所造成。采用中等模量的芳纶可以改善 ARALL 的剩余强度。

4. 成型工艺

图 5 是制造 ARALL 层合材料的典型工艺框图。由于铝合金和芳纶预浸带的热膨胀系数不同, 固化后在铝合金板中将产生拉伸应力, 在芳纶中将产生压缩应力。这种残余应力的存在对 ARALL 材料的性能将产生影响。

有两种方法可以改善这种状况。

第一种方法就是在 ARALL 固化后, 对其施加一定的预应变, 使金属板中产生小小的塑性应变, 这样可使其疲劳性能得到进一步改善 (见图 3)。但是这种方法的缺点是使压缩屈

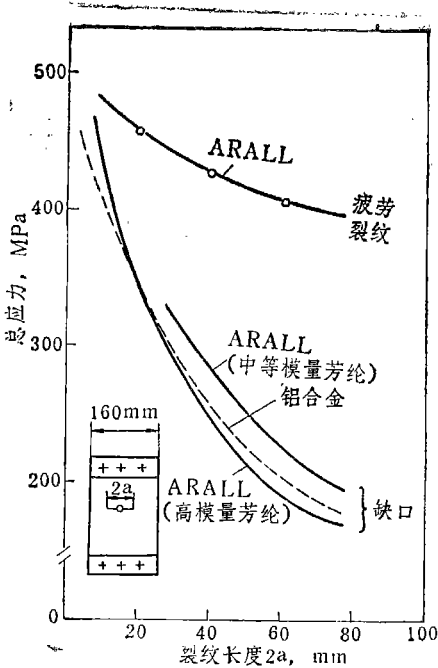


图 4 带有疲劳裂纹和缺口的 ARALL 与铝合金板的剩余强度

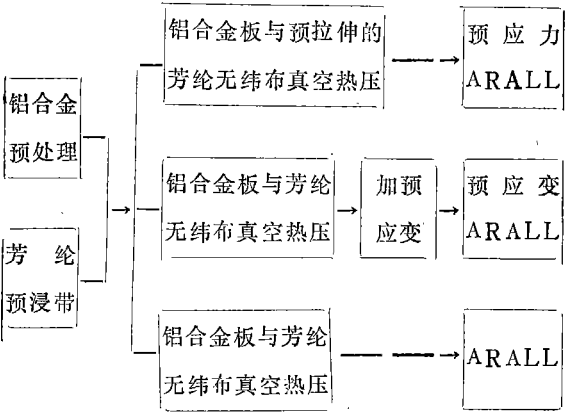


图 5 制造 ARALL 的工艺流程简图

服应力有所降低。

第二种方法就是在固化前和固化过程中, 给芳纶施加一定的预应力。初步实验表明, 这是一种比较可行的方法。

5. 加工性

ARALL 可以很容易地切割、钻孔、锯和铣, 既可以采用传统的钻孔铆接的方法, 也可以用胶接的方法将由 ARALL 制造的零部件或

不同部分联接起来。

6. 耐久性

一系列长期和短期的环境老化实验表明, 由于金属的不渗透性, ARALL 具有良好的耐久性。

三、ARALL材料的应用情况

由于ARALL层合材料与铝合金相比具有优异的耐疲劳性能和更好的静态强度, 因而它很有希望取代飞机上的某些受疲劳状况控制的关键铝合金部件, 以提高性能, 减轻飞机重量。目前, 最有希望首先用ARALL取代的两个飞机结构部件是: (1) 机翼的下蒙皮; (2) 机身的圆筒段。

Fokker飞机公司F-27飞机的初步设计和飞行试验表明, 用ARALL制造的板, 比起同样大小的铝合金板, 重量可减轻14%, 由于其强度高和耐久性好, 经过重新设计的机翼板(包括更薄的表皮)的总重量可减少30%左右。据估计, 用这种材料制造同样大小的波音747, 重量可减少40%。

试验结果表明, ARALL 具有很好的耐疲劳性能。例如, ARALL材料能经受和波音747机身材料同样的疲劳试验。1.6~1.8mm厚的一般铝合金机身能经受150000次飞行, 而1.3mm厚的ARALL却能经受1500000次飞行。

试验结果还表明, ARALL的其它性能也很好。例如, 经125000次模拟飞行后, ARALL材料的疲劳度比经5000次飞行的熟铝的还低。此外, ARALL的屈服应力和极限拉伸强度均高于铝合金, 而抗冲击强度比碳纤维增强复合材料的还好。

四、结 束 语

ARALL是一种非常有希望用于未来飞机结构的新型超混杂复合材料。其突出的优点是具有非常好的抗疲劳裂纹扩展能力, 在不开缺口的情况下, ARALL的静态强度优于铝合金

具有疲劳裂纹的ARALL板的剩余强度也比铝合金的好。但是, 带有缺口(切断纤维)的ARALL层合板的剩余强度不如铝合金, 而且其层间剥离强度较低。

虽然ARALL中含有芳纶, 但几乎金属的所有长处均得到了保留, 如塑性、冲击强度、耐闪电性、加工成型性等。

飞行试验表明, 对于飞机上的某些疲劳关键部件, 如机翼下蒙皮、机身, ARALL材料是一种非常有吸引力的材料, 它不仅可以提高性能, 而且还可以节省30%的重量。

目前, ARALL材料主要还存在两个问题:

(1) ARALL的剥离强度很低。在实际的ARALL结构中应当避免高于7N/mm的剥离应力。研究的初步结果表明, 纤维与树脂之间的粘接破坏是主要原因。因此, 寻求合适的树脂基体和纤维的表面处理方法, 改善纤维与树脂之间的粘接性能是需要解决的第一个问题。

(2) 在实际应用过程中, 结构破坏最常见的形式是疲劳裂纹。如前所述, ARALL层合材料具有比铝合金更好的抵抗裂纹扩展的能力, 但是, 对于由冲击(纤维切断)所造成的穿过层合板厚度方向的破坏, ARALL的断裂韧性不如铝合金。因此, 结构中的这种形式的损伤就成为一个令人关注的主要问题。研究表明, 就这方面而言, ARALL的性能是不利的。克服这个弱点的一个方案就是牺牲一些结构重量作为代价; 另一个方案就是采用铝-锂合金, 进一步减轻ARALL材料的重量; 提高其断裂韧性。

参 考 文 献

- [1] Vogelesng, L.B., ARALL, A Material for the Next Generation of Aircraft, A State of the Art, N84-21674.
- [2] 新型航天材料, 国外科技动态2, 31 (1986)。
- [3] 周自强, 宇航用金属基复合材料和金属材料在欧美的新进展, 宇航材料工艺, 4 (1986)。