

纤维金属层板在飞机制造中的应用及工艺性分析

Application and Property Analysis of Fiber-Metal Laminate for Aircraft Manufacturing

中航工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司 吴志恩

[摘要] 金属基复合材料对飞机强度性能,抗疲劳、抗温、抗蚀、减重等能力上都比一般材料好,但造价较贵,工艺较为复杂,使用上受到一定限制。纤维金属层板在飞机结构上使用的基本是芳纶纤维增强铝合金层板(ARALL)、玻璃纤维增强铝合金层板(Glare)和碳纤维增强钛合金层板(TiGr)3种。但由于剥离强度较低,断裂韧性差,使飞机寿命受到影响,ARALL在飞机上的使用受到限制,大的民航客机上用得很少。后来新的金属基复合材料层板开发出来,就逐渐被代替了。而其中的Glare相对来说却比较实用的,而且已经国产化。TiGr开始主要是结合航天尤其是火箭燃料箱需要而开发的,现在已经推广到飞机上使用。本文对纤维金属层板在飞机结构中的应用进行了阐述,并对其工艺性进行了一般分析。

关键词: 芳纶纤维增强铝合金层板 玻璃纤维增强铝合金层板 碳纤维增强钛合金层板

[ABSTRACT] Fiber-metal laminate has the good properties of high strength, anti-fatigue, anti-corrosion and reducing weight. ARALL (Armaid Reinforced Aluminum Laminates), Glare (Glass-Aluminum Reinforced) and TiGr (Ti-Graphic Reinforced Laminates) are widely used in aircraft structure. The application of fiber-metal laminate in aircraft structure is presented and the process is analyzed.

Keywords: ARALL Glare TiGr

近年来复合材料构件在飞机上的应用已经愈来愈广泛,随着飞机性能的不不断提高,对复合材料的要求也愈来愈高。纤维金属层板过去通称金属基复合材料在应用中引起了很大的关注。

迄今为止,纤维金属层板在飞机结构上使用的基本是:TiGr(Ti-Graphic Reinforced Laminates,碳纤维增强钛合金层板)、ARALL(Armaid Reinforced Aluminum Laminates,芳纶纤维增强铝合金层板)、Glare(Glass-Aluminum Reinforced,玻璃纤维增强铝合金层板)3种。

A380机身上使用的Glare层板达到470m²,与传统铝合金相比,减重25%以上,疲劳寿命提高10~15倍。垂尾前缘更是使用长达14m的Glare层板结构,大型整体结构的使用可见一斑。

波音787最有里程碑意义的变革是使用了复材机翼、机身结构,并在结构维护上做出了实质性进展。同时,TiGr层板(碳纤维增强的钛板)、耐高温复合材料结构也在机翼前缘、发动机吊舱上获得应用。

以ARALL为例,按照西方资料报导ARALL比纯铝板密度降低15%~20%,而抗疲劳性能比铝板高60%。极限强度按国内开发的材料CB-1-02,其纵向断裂强度为673MPa(和西方接近),约为铝板的1.6倍。其他如Glare也与之相差无几,但其抗剥离性能较差。而TIGR性能上更见优越,尤其是其可以用到175℃,更适用于超音速飞机和一般客机的高温部分。

纤维预浸料用的胶主要是热固性的环氧树脂胶,也可使用热塑性塑料如PEEK(聚醚醚酮)、聚苯硫醚和聚酰胺等取代热固性树脂胶。胶接蜂窝夹层结构也是一种特殊的结构用复合材料,它把蜂窝的夹芯材料夹在两块面板之间并用胶粘剂粘接。因为具有良好的比强度和比刚度,因此在未来的大型客机、军用机及无人机等机体具有很大的使用前途。

1 芳纶纤维增强铝合金层板(ARALL)

芳纶纤维增强铝合金层板由荷兰Delft技术大学于20世纪70年代开发。

由薄的经表面处理并涂底胶的铝合金板和芳纶预浸料交替铺层,通过环氧型粘接剂经加温加压固化而成的层压板,简称为ARALL。一般铝合金板的厚度为0.3mm,芳纶预浸料厚度为0.2mm。其是纤维增强金属层压板中研究应用最早的类别。ARALL主要特点为在纤维方向的极限强度远大于相应的铝合金,但断裂延伸率比铝合金低;止裂作用明显,经过按设计要求3倍的载荷进行疲劳试验,也仅仅出现一个小小的裂纹;抗损伤容限好,即使有几个毫米的疲劳裂纹仍可安全工作;具有抗雷击的能力,在1~1000Hz内,声阻尼性能比整体铝板高2.3倍。但其剥离强度较低,主要原因是芳纶与树脂之间的界面结合差,破坏常常发生在这一界面。

工艺上具有与铝合金和一般复合材料件相同的加工性,无需另考虑增加加工手段。例如拉伸、滚压、靠模铣切,钻孔,热压罐使用、胶接和铆接等。铺层最好在铺带机上进行,因为金属面板具有一定刚性,手工铺层难

以压实。曲度大在铺带机上难以达到曲度要求时,可以铺到近似曲度,再在热压罐或压床上压到最后曲度。铺丝和 RFI 工艺由于材料供货或工艺流程问题对金属基复合材料不适用。

ARALL 有 1 型和 2 型, ARALL 1 用的铝板是 7075 合金, ARALL 2 用的是 2024 合金。1 型比 2 型强度高得多,但一般采用 2 型。

ARALL 2 型的有关强度数据为断裂强度 $680 \pm 37\text{MPa}$,弹性模数 30.1GPa (均纵向)。国内开发的 ARALL,其有关性能如表 1 所示。

早年 Fokker 公司在 F-27 上制造了两个机翼板件,装机飞行达到设计寿命 3 倍后检查,仅出现一个小裂纹。后来 1988 年在承包的 C-17 运输机后货舱门,T-38,和 F100 上也用了该材料。

表1 牌号: CB-1-02机械性能^[1]

测试方向	测试条件 / $^{\circ}\text{C}$	屈服强度 /MPa	断裂强度 /MPa
纵向	25	418	673
	130	397	604
横向	25	232	303
	130	225	300

的铝板 2024T3 中间夹上玻璃纤维预浸料,通过环氧树脂胶接而成的复合材料结构,根据需要可以是 2 块铝板和 1 组玻璃纤维层压件层压而成(如 Glare2/1),也可以是多块铝板,每两块铝板中间一组玻璃纤维层压件。

A320 的机身上使用的 Glare 层板达到 470m^2 ,由于其密度比铝合金低 8%,与传统铝合金相比,减重 25% 以上,疲劳寿命提高 10~15 倍。垂尾前缘更是使用长达 14m 的 Glare 层板结构。A380 上 Glare 应用更为广泛,达 380m^2 。

此外,如波音 737,波音 757,波音 777 等大型飞机以及小型飞机 Learjet-45 上都用了不少 Glare。

由于 Glare 密度比铝合金小, A380 全机总共减重 794kg。

Glare 的通用品种及技术性能见表 2,国产 Glare 牌号 CB-2 的机械性能见表 3。

Glare 所需层数根据设计需要而选择,有时是以半成品状态供应如图 1 所示,此时即需自行粘上中间面板,贴上的面板如供应商没有说明外要根据供应商要求用铬酸或磷酸处理。

Glare 件的加工条件和一般复合材料件没有什么区别,和上述 ARALL 所述的基本一样,水切割是比较通用的下料方式。

表2 各规格Glare性能^[2]

材料		拉伸极限 /MPa		0.2% 屈服点拉力 /MPa		弹性模数 /GPa		最大拉力时应变 /%	
		纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
Glare1	3/2	1282	352	545	333	65	50	4.2	7.7
	2/1	1077	436	525	343	66	50	4.2	7.7
Glare2	3/2	1214	317	360	228	66	50	4.7	4.7
	2/1	992	331	347	244	67	55	4.7	4.7
Glare3	3/2	717	716	305	382	58	58	4.7	4.7
	2/1	662	653	315	287	60	60	4.7	4.7
Glare4	3/2	1024	607	352	255	57	50	4.7	4.7
	2/1	843	552	321	250	60	54	4.7	4.7
Glare5	2/1	683	581	297	275	59	59	4.7	4.7
2024T3		455	448	359	324	72	72	19	19
7075T6		545	545	476	476	69	69	13	13

但由于剥离强度较低,断裂韧性还是差,飞机寿命受到影响, ARALL 在飞机上的使用受到限制,大的民航客机上用得很少。后来随着新的金属基复合材料层板开发出来,就逐渐被代替了。

2 玻璃纤维增强铝合金层板(Glare)

Glare 于 1991 年投入市场,是由多层厚 0.3~0.5mm

表3 CB-2机械性能^[3]

材料	测试方向	测试条件 / $^{\circ}\text{C}$	屈服强度 /MPa	断裂强度 /MPa
CB-2-01	纵向	25	317	1034
		100	304	882
CB-2-02	纵向	25	261	653
		100	292	627

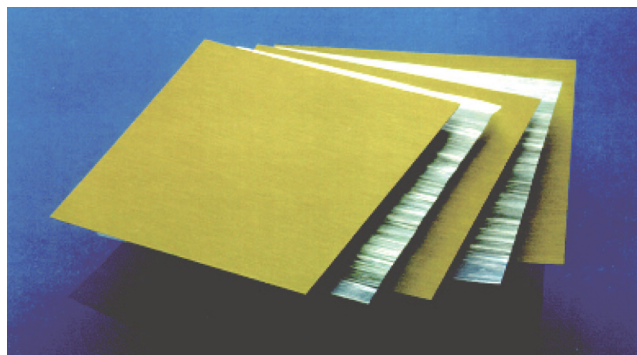


图1 半成品Glare
Fig.1 Semi-finished Glare

3 碳纤维增强钛合金层板(TiGr)

两面用钛合金薄板,中间夹上以碳纤维增强加压而成的层压板,称之为碳纤维增强钛合金层板 TiGr (TI-Graphiite Reinforced)。它既在低温时有抗腐蚀性能,又能适应于高温 170℃,甚至高于 170℃使用,并能抗疲劳且具有较高韧性的一种新型复合材料件。其适应了航天航空发展的需要。

TiGr 开始主要是结合航天尤其是火箭燃料箱需要而开发的,现已经推广到飞机上使用。它是由薄的经表面处理并涂底胶的钛板和碳纤维预浸料铺层。

纤维材料与 PEEK (聚醚醚酮)在夹层中聚合成为聚合物。

PEEK 是结晶塑性高分子材料,熔点 334℃,加入碳纤维后,热变形温度可达 3000℃以上,韧性好、阻燃、自熄、发烟少、耐幅射、耐剥离、电性能、耐疲劳性、耐磨、耐冲击和耐水好的一种材料。

钛箔有纯钛的还有合金钛(钛或称 Gummental 的),两者机械性能见表 4。

表4 钛,β钛机械性能^[3]

机械性能	纯钛		β钛(GM-Gummental)	
	滚压方向	横向	滚压方向	横向
杨氏模数/GPa	74.7	109.9	72.0	80.0
σ_B /MPa	316.6	303.9	1070.1	1117.7
$\sigma_{0.2}$ /MPa	187	225	741~863	860~989
屈服点应变/%	0.471	0.498	1.2~1.5	1.2~1.5

由表 4 可以看出:β钛是纯钛极限强度的 3 倍,其它如屈服点强度及应变也大 3~4 倍左右,而杨氏模数却彼此接近。总的看β钛对结构性能更为有利。对整个 TiGr 来说,通过试验,划出来的应力应变曲线基本上也就和表 4 一致,也就是说表 4 也基本上代表了 TiGr 的机械性能。TiGr 除了疲劳性能和韧性好以外,它还可以耐温范围从 -70~175℃。

TiGr 不仅是从设计上,从材料选用上充分考虑到了先进的、高速的飞机的各项要求,而且经过了一系列充分试验,证实了它能充分满足这些要求。这些试验还包括断裂、脱层和冲击等。

冲击试验:模拟最危险紧急迫降尾部着地状态,在 -196℃、-70℃、23℃、180℃下以 2.25~5m/s 的速度冲击试验。

4 工艺问题

TiGr 的工艺问题比上述两种复合材料件复杂,除了铺层更应采用自动化数控铺带外,其切削设备和刀具的选择也要引起足够注意。热压罐要能加温到相应温度以上(180℃)。金刚石刀具被认为是理想的切削工具。机床切削时转速要慢,用水冷却。切削后修磨边缘(手工),缺口会使裂纹向多个方向扩展,并同时产生脱层现象。装配时钻孔用的钻头,不论是材料、钻头,还是排屑问题都很有说道,寻求市场上专业供应商的合作很重要。

TiGr 不能像 Glare 一样以半成品状态供应,因为它的胶接剂 PEEK 是熔点 334℃的高温塑料,自己贴面板时热压罐等设备可能也都不适应,而且一系列强度试验也非一般单位所能完成。

TiGr 层板是耐高温复合材料结构,已在波音 787 机翼前缘、发动机吊舱上获得应用。更大的应用是在即将发展的超音速飞机上,由于磨擦会发生的表面高温,TiGr 适应性较好。TiGr 目前在航天火箭的燃料箱上使用,被认为是抗漏的良好材料。

总之,金属基复合材料对飞机强度性能,抗疲劳、抗温、抗蚀、减重等能力上都比一般材料好,但造价较贵,工艺较为复杂,使用上受到一定限制。而其中的 Glare 相对来说却是比较实用的,而且已经国产化。值得研究的是空客在 A380 上曾大量采用了 Glare 而为什么在 A350 上却不用了呢?这可能还是因为价格成本问题,如果强度温度等都能满足,那就还是采用碳纤维复合材料合适。但是在特殊要求下,如高温要求,TiGr 却是不可替代的材料,这也是波音 787 在机翼结构上首先采用的主要原因。

参考文献

- [1] Wu GC, Yang J M. The machanical behaviour of GLARE laminate for aircraft structure. JOM, 2005, 57(1): 72-79.
- [2] Machnical properties of CFRP/TI ALLOY laminated composites. Japan: Aoyamagakuin University.
- [3] 益小苏. 先进复合材料技术研究与发展. 北京: 国防工业出版社, 2004.

(责编 三丰)