

GLARE层板复合材料零件成形与装配技术浅析

Brief Analysis on Forming and Assembling Technique of GLARE Composite Parts

西安飞机工业(集团)有限责任公司 黄侠 袁红璇 蔡鸣豪



黄侠

西安飞机工业(集团)有限责任公司高级工程师,西飞公司工艺研究所制造技术室主任。长期从事飞机制造(冷)工艺技术领域的研究以及新材料、新工艺、新技术在飞机型号研制中推广应用等工作。

复合材料家族中的新成员GLARE层板,由于空客公司A380飞机的问世而受到世人的关注。GLARE层板是复合材料中的新型品种,该材料结合了金属材料 and 纤维树脂基复合材料的优点,并克服了各自

GLARE层板是复合材料中的新型品种,该材料结合了金属材料 and 纤维树脂基复合材料的优点,并克服了各自的缺点,使其密度小、强度高、疲劳性能和损伤容限性能好、维护维修方便等优势得到充分地体现。

的缺点,使其密度小、强度高、疲劳性能和损伤容限性能好、维护维修方便等优势得到充分体现。空客公司在A380飞机研制中采用GLARE层板作为机身蒙皮材料,其面积达 470m^2 之多,约占飞机结构总重量的3%~4%。与传统的铝合金材料相比,结构减重达25%~30%,疲劳寿命提高10~20倍。

GLARE层板的结构性能与碳纤维复合材料(CFRP)相比在很多情况下更像铝合金,通过优化工艺设计,GLARE层板零件的制造还可以采用铝合金传统加工方法进行切割、修边、制孔与铆接,使其制造成本只有碳纤维复合材料的1/2。GLARE层板既有碳纤维复合材料自身的先

进性,又有铝合金材料优良的加工性,用其制造航空产品成本低、效率高,所以一经问世就引起世界各先进航空制造业的关注。

GLARE层板在现代飞机制造中的应用过程与现状

GLARE层板是一种新型混杂复合材料,它是由0.3~0.5mm高强度铝合金薄板与0.25~0.5mm玻璃纤维预浸料相互交替铺层,经一定固化工艺成型得到的一种层板。业内人士称其为纤维-金属层板(Fiber-Metal Laminate, FML)。如图1所示。

纤维-金属层板的概念最早是由荷兰Delft技术大学科学家率先提出,并与荷兰Fokker飞机公司、

美国 3M 树脂公司、ENKA 芳纶公司和 Alcoa 铝公司等研究机构合作进行了第 1 代纤维-金属层板的研制,即 ARALL (Aramid Reinforced Aluminum Laminate, ARALL) 层板,又称芳纶-铝合金层板,后来被应用到航空、航天、磁悬列车以及军事装备等领域。如荷兰 Fokker 公司用 ARALL-2 制造了 F-27 飞机机翼下翼壁板(面积为 $2\text{m} \times 1.3\text{m}$),于 1987 年进行了飞行试验。与原来的铝合金结构件相比,重量减轻 33%,疲劳寿命提高了 3 倍。美国 Lockheed 飞机公司于 1989 年用 ARALL 层板制造了 C-17 军用运输机货舱门(面积为 $9.69\text{m} \times 5.64\text{m}$),重量减轻 23%,疲劳寿命也有显著的提高。

由于 ARALL 层板制造存在一

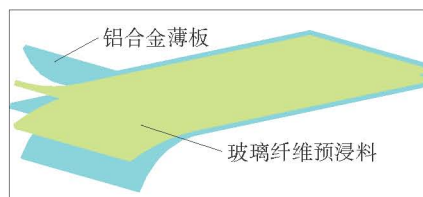


图1 纤维-金属层板结构

些应用技术问题(如芳纶和铝合金的热膨胀系数相差较大),在层板固化过程中会形成较大的残余应力,而对层板残余应力的调整又比较困难,还有芳纶纤维的断裂应变较小,导致 ARALL 层板成型时的变形范围非常小。因此,ARALL 层板在飞机结构中的应用部位基本上是平板结构或单曲面小曲率构件,所以在飞机上的应用空间非常有限。

为了满足飞机产品双向承载和曲面结构应用的需要,荷兰 AKZO 公司开发研制了第 2 代纤维-金属层板,即 GLARE (Glass Reinforced Aluminum Laminate, GLARE) 层板,又称玻璃纤维-铝合金层板。与 ARALL 层板相比,GLARE 层板的密度较高、模量较低、成本降低,而且疲劳性能、拉伸强度、压缩性能、冲击



图2 用 GLARE-3 制造的 A380 机身上壁板

性能和阻尼性能都有显著提高。玻璃纤维双向或多向铺层的 GLARE 层板可以不调整残余应力。另外,GLARE 层板的断裂应变与 ARALL 层板相比要更大,因而成型变形范围也较大,不但可以满足飞机平板结构和单曲面小曲率构件成形的要求,也可以用于曲面结构零件的制造,在飞机上的应用空间比较广泛。

经过一段时间的系统研究和应用考核,人们对 GLARE 层板的优越性能有了充分地认识,其在航空上的应用充满信心,目前空客公司制造的世界最大客机 A380 机身上采用 GLARE 层板作为机身桶段是最有说服力的事实。

A380 飞机除下壁板由于环境腐蚀问题没有采用 GLARE 层板外,机身上壁板和侧壁板的蒙皮及上壁板处的长桁均为 GLARE 层板,通过激光焊接成为壁板组件。更值得关注的是空客公司采用 GLARE 层板贴模拼接技术制造出了大型双曲率的飞机结构件(见图 2)。另外

空客公司应用 GLARE 层板在尾翼前缘、扰流板和整流罩等部位的应用试验也突破了 ARALL 层板仅在小曲率结构部件上的应用,为 GLARE 层板制造飞机各类蒙皮类零件奠定了坚实的技术基础。

国内在 20 世纪 80 年代,上海交通大学、国防科技大学、北京航空材料研究院和一些航空企业就对纤维-金属层板进行过研究。对第 1 代 ARALL 层板开展了理论基础和生产应用方面的研究工作。通过试验研究和工艺验证,完成了 ARALL 层板的研制,材料的力学性能与美国军用材料规范要求的水平一致,并在某

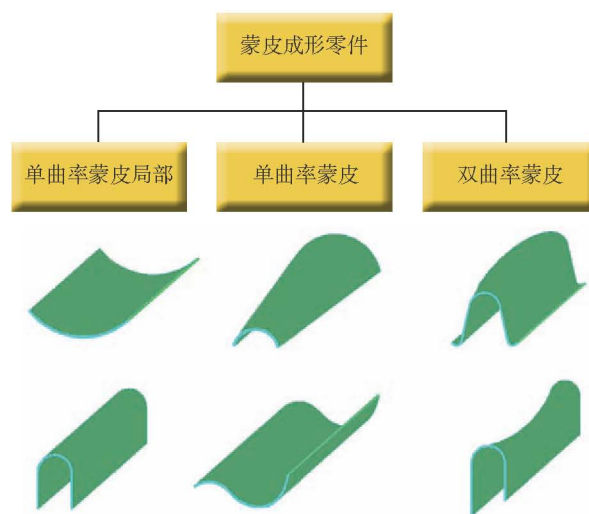


图3 飞机蒙皮成形零件

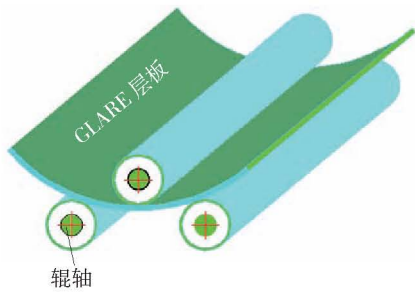


图4 滚弯成形工艺过程

型号飞机上装机批量应用。经过多年的飞行,未出现任何分层和裂纹缺陷,解决了原铝合金结构存在疲劳裂纹的问题,同时获得飞机结构与原铝合金结构相比重量减轻 23%、提高疲劳寿命 3 倍以上的使用效果。北京航空材料研究院在 20 世纪 90 年代末又对第 2 代纤维-金属层板 GLARE 层板材料开展了系统的研究,建立了相关性能的理论计算和分析模型,研制的层板性能与国外供应商提供的材料相当,并取得可靠试验数据,使我国先进材料制造技术水平有了实质性的进展。

GLARE 层板复合材料零件成形与装配技术

1 GLARE 层板可成形性分析

材料的可成形性是指板材适应各种成形的加工能力。研究成形性,就是要在研究中找到成形性指数,掌握板材的成形极限。飞机常用的铝合金材料具有较好的可塑性和延展性,人们通过基本成形性试验获得的指数(弹性模量 E 、屈服点 $\sigma_{0.2}$ 、抗拉强度 σ_b 及极限延伸率 δ)来判断其成形性的好与坏,通过弯曲成形试验,对最小弯曲半径等工艺参数进行分析,确定其材料的可成形性。

GLARE 层板结构比较复杂。采用不同的纤维规格、胶粘剂体系、预浸料铺层方向、铺层次序、铺层厚度和铝合金薄板表处方式等,可以得到多种不同性能的 GLARE 层板,而不同性能的 GLARE 层板其成形性也各不相同。从采用的材料标准中我

们可以得知,铝合金薄板材料的极限拉伸强度远小于玻璃纤维材料的极限拉伸强度,而铝合金薄板材料的极限拉伸应变却远大于玻璃纤维的极限拉伸应变(约占 4%)。GLARE 层板是 2 种材料加树脂,通过加热加压固化而成的新型混杂复合材料,在进行基本成形性试验(单向拉伸)时, GLARE 层板试件的断裂首先是玻璃纤维的断裂,这是玻璃纤维的极限拉伸应变小于铝合金薄板所致。因此,在纤维方向上纤维的断裂应变限制着纤维的塑性应变。由于纤维断裂之前发生的都是弹性变形,层板在纤维方向上变形后将产生相当大的回弹(在 GLARE 层板中,纤维方向上回弹使余留极限拉伸应变减少仅有 2%~3%)。所以在成形工艺实施中,完全套用铝合金材料成形工艺制造 GLARE 层板零件是不可取的。

根据目前 GLARE 层板在航空产品的应用状况分析, GLARE 层板应用最多的部位是飞机蒙皮类零件。飞机蒙皮成形零件有单曲率和双曲率 2 种形式(见图 3)。据国外有关资料介绍,使用 GLARE 层板材料制造蒙皮类零件可以采用滚弯成形和铺贴成形(金属薄板和预浸料之间的铺层)工艺完成。

对单曲率的圆筒形和圆锥形零件按照铝合金蒙皮的成形方法,选用滚弯成形工艺是可以实现的。但是使用 GLARE 层板材料滚弯时必须进行合理的工艺设计,板料从 3 根同步旋转的辊轴间通过(见图 4),并连续产生塑性弯曲成形后层板的顺纤维方向会产生回弹。如果出现顺纤维的移动方向小回弹量与纤维切面方向的回弹量不一致的现象,就有可能产生缺陷。所以对滚弯成形所用的工艺参数(辊轴压下量、辊轴距离、成形力值等)要进行验证与调整,工艺稳定后方可进行生产。

双曲率蒙皮成形的技术难度非常大,如果按照铝合金蒙皮的成形方

法,选择拉深成形, GLARE 层板在拉深成形过程中,材料在水平面上的各个方向均有延展。也就是说,不管进行纵向拉形还是进行横向拉形,层板中的纤维都必将受到拉伸。此外,机身结构上的纤维铺层方向通常是正交方向,层板的铺层交错进行,纤维的损伤应变非常小,因此极限拉伸应变应用也是有限度的。基于此限制,拉深成形工艺不适合 GLARE 层板零件制造。

2 GLARE 层板零件成形技术

使用传统的铝合金材料成形工艺技术方法,使得 GLARE 层板应用受到极大的限制。科学家们通过研究发现了适用 GLARE 层板成形的工艺方法——铺贴成形。即借鉴碳纤维复合材料铺层工艺,在类似复合材料制件的铺层模具上进行独立层间的铺层,经加温加压固化后得到制件。工艺过程与复合材料制件制造基本相似,仅有的差别是铺层材料不仅有预浸料还有铝合金材料,铝铺层材料在工艺实施前还要进行预处理,而铺层时贴模度也不如碳纤维预浸料好。

对于单曲率飞机蒙皮的制造,按照工程图样的要求,选择整体铝合金薄板和预浸料进行铺层。铝合金薄板和预浸料铺层宽度尺寸可以参考材料供应状态,单独的铺层长度尺寸没有限定,因为 2 种材料长度方向上的供应状态可以按用户需要提供。其制造工艺流程在考虑 GLARE 层板材料结构的特殊性前提下,按照碳纤维复合材料制造工艺流程实施可以完成 GLARE 层板的零件制造。

对于双曲率飞机蒙皮的制造,应采用贴模拼接技术。贴模拼接技术还是借鉴碳纤维复合材料铺层工艺在模具上实施完成,经加温加压固化后得到制件。有所不同的是,所用的铝铺层材料按照工程图样要求剪裁成片料(片料铺层的最大宽度由蒙皮的曲率决定),同一层铝铺层材料需

要使用多个片料,每个片料之间采用“对接”或“搭接”形式连接。不同铝铺层接缝位置为交错排列,接合区内交迭拼接的宽度受到一定限定。

3 GLARE 层板零件的装配技术

无论何种材料的飞机蒙皮类零件,在进行装配施工时,都需按装配工艺流程进行装配, GLARE 层板零件装配也不例外(见图 5)。GLARE 层板零件可以按照传统铝合金制件采用的装配协调方案、容差分配关系进行装配。

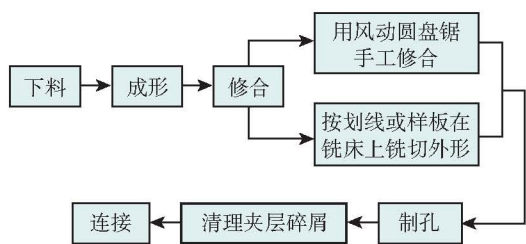


图5 装配流程

(1) GLARE 层板零件修合工艺。

GLARE 层板零件预装后需要进行修合。可以采用传统的铣切工艺方法进行修边,但是在铣切过程中有许多参数必须进行综合考虑。如铣切类型、铣刀直径、铣切速度、进给率和铣切条件,都要根据 GLARE 层板类型和厚度进行匹配选择。在 GLARE 层板的修边工艺实施过程中,严格控制限定组合参数的符合性,尤其是进给率和铣切条件(设备的状态、选用的润滑剂),它们是影响边缘铣切质量的重要因素之一。除了手工修边和铣切修边,薄板在加工工序安排上还可以使用水切割和激光切割等加工方法,但是这 2 种工艺方法加工后的边缘质量均不能作为最终加工工序,水切割加工后的粗糙边缘可能会产生疲劳裂纹,使激光切割边缘产生一个小的热影响区。

(2) GLARE 层板零件的制孔工艺。

GLARE 层板零件在装配型架上修合后,可以按照加工铝合金材料的

方法进行制孔,只是刀具选择有所不同,要保证制孔的质量,必须选择适用的刀具。加工 GLARE 层板时,加工过程包含了对塑性好的铝合金板和对塑性差的玻璃纤维层的切削加工,两种塑性差异较大的材料粘接在一起会导致刀具磨损,加工性降低,产生制孔缺陷。

GLARE 层板零件制孔过程中容易出现 2 种缺陷:第一,孔壁“分层”,即在刀具的进出口处出现层板间的剥离和撕裂现象;第二,“纤维拉出”,

即在进行制孔时,刀具稍有不妥,层板切口处就会出现约 1.5~2.5mm 长的玻璃纤维拉出。

避免缺陷的方法是:首先,在生产前进行制孔工艺验证试验,选择适用的刀具,匹配合理的工艺参数,在试板上制孔使工艺达到

稳定。其次,按产品骨架上的导孔或划线制孔时,制件必须充分夹紧。采用分步钻孔,先钻小孔,然后在蒙皮另一侧垫上垫板将孔扩至最后尺寸,实施划线钻孔工艺,背面必须使用支撑垫板以防止层板的损坏。再者,制孔时在层板上施加垂直进给力,当钻头从层板中退出时,这些力非常大也能引起“分层”,所以制孔时要控制好进给力参数。由于 GLARE 层板中纤维材料的韧性使其很难切割,制孔时刀具如果磨损也会导致纤维不能完全切割而使孔壁产生“纤维拉出”。所以在制孔时发现刀具磨损应及时更换,避免出现“纤维拉出”现象。

(3) GLARE 层板零件的连接工艺。

GLARE 层板蒙皮与长桁连接,可以按照传统工艺采用二次胶接固化、机械连接、手工连接等多种方式进行。采用二次胶接固化,可以按照传统金属胶接工艺方法进行;采用机械连接,结构元件上制孔与铝合金制件上相类似,可采用自动钻铆设

备、电磁铆接设备进行紧固件安装。由于飞机产品结构的复杂性和特殊性,手工连接方法仍在装配生产线上广泛应用。

手工连接通常有铆接和螺接 2 种形式,可以按照传统的手工连接工艺方法进行,但是还略有不同。手工铆接选用的连接件是平头大圆角铆钉系列,这类铆钉的安装由于材料结构的特殊性(表层铝合金薄板非常薄)制孔时不需镗窝。铆接过程中,钉杆变形形成镦头的同时也在孔内膨胀。这种膨胀对铝合金实体材料来说非常有利,孔的膨胀使孔周围形成稳定的强化层,这种膨胀将给 GLARE 层板材料带来缺陷,铆钉杆膨胀将会引起孔周围出现“分层”,避免这类缺陷的方法是施铆时增大夹紧力抑制分层。手工螺接对于间隙配合安装的螺栓没有问题,对于干涉配合安装螺栓,当用力迫使螺栓进入 GLARE 层板复合材料制件上的孔时,也会产生“分层”缺陷,所以合理的选择紧固件安装配合关系可以防止这种缺陷的产生。

结束语

目前,国内自主研发的 GLARE 层板复合材料已有突破性的进展,研究 GLARE 层板复合材料零件、装配件制造工艺过程的任务已提到议事日程上来,研究和掌握其关键工艺技术刻不容缓。我国在 GLARE 层板复合材料零件的制造与装配工艺技术研究方面还处于起步阶段,缺少这一方面工艺实施经验,也没有工艺规范的指导。所以我们在进行 GLARE 层板应用技术研究时,首先应考虑我们现有的基础,借鉴第 1 代 ARALL 层板应用研究的经验与教训,充分发挥本企业在制造碳纤维复合材料构件上的生产技术能力,扎扎实实从工艺适用性研究做起,尽早掌握其零件制造和装配关键技术。

(责编 玉龙)