

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.08.011

宽尺寸大厚度蜂窝夹层扰流板制造技术

邓飞飞, 成艳娜, 唐珊珊, 刘明泽, 张恪玮, 刘敏

(中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089)

摘要: 复合材料全高度蜂窝夹层结构拥有较大的弯曲强度和弯曲刚度, 是一种承载效率较高的结构形式。但这类结构形式的产品次级零件多, 装配关系复杂, 工艺制造流程繁琐, 成型后产品的内部质量及表观质量不易控制, 存在较高的技术风险。因此, 通过简化次级零件结构组成、减少装配协调关系、提升胶接质量相结合的方法, 以提升全高度蜂窝夹层结构产品的整体质量。以一种宽尺寸、大厚度的蜂窝夹层扰流板零件为研究对象, 从蜂窝芯稳定化、成型工艺方案、组件质量控制和型面精度控制等方面展开研究, 探究了蜂窝夹层扰流板零件制造过程中的关键技术, 解决了零件制造过程中产生的技术质量问题。结果表明, 大厚度大斜角蜂窝芯可以通过倒放在模具内实现稳定化, 提高芯材的刚性; 采用二次胶接成型工艺, 可以提高次级零件各环节的加工质量, 最终制造的扰流板零件超声检测、X光检测、零组件质量和贴模间隙均满足设计要求, 型面精度满足装配需求。该研究成果可应用于飞机的扰流板、舱门等次承力结构中。

关键词: 蜂窝夹层结构; 扰流板; 工艺方法; 二次胶接; 技术质量

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)08-0066-06

Manufacturing Technology of Wide-size and Large-thickness Honeycomb Sandwich Spoiler

Deng Feifei, Cheng Yanna, Tang Shanshan, Liu Mingze, Zhang Kewei, Liu Min

(AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Co., Ltd., Xi'an 710089, China)

Abstract : The composite full height honeycomb sandwich structure is a structural form with high bearing efficiency, which has the characteristic of large bending strength and stiffness. However, the products of such structural form have many secondary parts, complicated assembly relationships, and complex manufacturing processes, the internal quality and apparent quality of the formed product is not easy to control, which has high technical risk. Therefore, the overall quality of full height honeycomb sandwich structure products was improved by simplifying the composition of secondary parts structure, reducing the coordination of assembly, and improving the glue quality. Based on a wide-size and large-thickness honeycomb sandwich spoiler as a research object, conducting research from the aspects of honeycomb core stability, molding process scheme, component weight control and surface accuracy control, the key technologies were explored and the technical quality problems were solved in the manufacturing process of honeycomb sandwich spoiler. The results show that the large thickness and large diagonal honeycomb core can be stabilized by being inverted in the mold to improve the rigidity of the core material. Finally, by using secondary bonding and improving the processing quality of each link of the secondary parts, ultrasonic detection, X-ray detection, component weight, and die gap of the manufactured spoiler parts all meet the design requirements, and the surface accuracy meets the assembly needs. The research result can be applied to secondary loading-bearing structures of airplane doors and spoilers.

Keywords : honeycomb sandwich structure ; spoiler ; process design ; secondary bonding ; technical quality

树脂基纤维增强复合材料具有力学性能优异、可设计性强、比强度和比模量高、减重效果好等特点, 被广泛应用于航空、航天、汽车、铁路建设及医

学等领域^[1-5], 且应用比例逐步提升。其中蜂窝夹层复合材料结构拥有较大的弯曲强度和弯曲刚度, 承载效率高, 是复合材料制件中常见的一种结构形

通信作者: 邓飞飞, 硕士研究生, 工程师, 主要从事树脂基复合材料制造工艺研究

收稿日期: 2023-06-10

引用格式: 邓飞飞, 成艳娜, 唐珊珊, 等. 宽尺寸大厚度蜂窝夹层扰流板制造技术[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(8): 66-71.

Deng Feifei, Cheng Yanna, Tang Shanshan, et al. Manufacturing technology of wide-size and large-thickness honeycomb sandwich spoiler [J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(8): 66-71.

式,在航空领域的应用前景备受关注^[6-9]。

飞机扰流板是蜂窝夹层结构的典型应用部位,通常由内外蒙皮、蜂窝芯、梁、角片、垫板和挡块等部分组成。然而,该类部件次级结构多,组件装配关系复杂且胶接质量不易控制,导致成型质量不稳定^[10]。以全高度蜂窝夹层扰流板结构为例,其由复合材料上下蒙皮和蜂窝芯组成,蜂窝芯面内尺寸宽、厚度高、四周斜角大且型面下陷较多,加之上下蒙皮层多,导致组合件装配后的内部质量和表面质量差,严重限制了其在飞机结构上的进一步应用^[11]。为此,可通过简化扰流板次级件组成结构、减少装配协调关系、提升胶接质量相结合的方法,提高该类结构制造质量和效率。笔者以大厚度大斜角蜂窝夹层扰流板为研究对象,通过理论分析和工艺试验论证,从蜂窝芯稳定化、成型工艺方案、组件质量控制及型面精度控制等方面开展研究,制造出合格的扰流板零件,为后续超大型全高度蜂窝夹层结构零件制造提供技术支撑与理论指导。

1 蜂窝夹层扰流板结构分析

1.1 扰流板结构

全高度蜂窝夹层扰流板零件由上、下蒙皮及蜂窝芯三部分组成,零件面内尺寸为2 400 mm×1 200 mm,结构如图1所示。上蒙皮曲率很小接近平面结构,下蒙皮为盆形结构,芯层材料为Nomex 蜂窝芯,其最大厚度达98 mm。上、下蒙皮最大厚度分别为4.86 mm和5.41 mm。

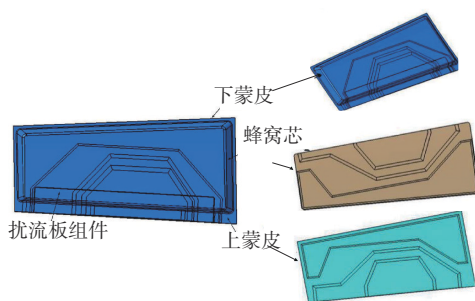


图1 蜂窝夹层扰流板零件示意图

1.2 扰流板零件材料

高韧性高温固化环氧高强中模碳纤维单向带:AC531/CCF800H, I 型1类CCF800H级,中航复合材料有限责任公司;

高韧性高温固化环氧高强中模碳纤维织物:AC531/CF8611, II 型2类CF8611级,中航复合材料有限责任公司;

高韧性高温固化环氧玻璃织物预浸料:AC531/

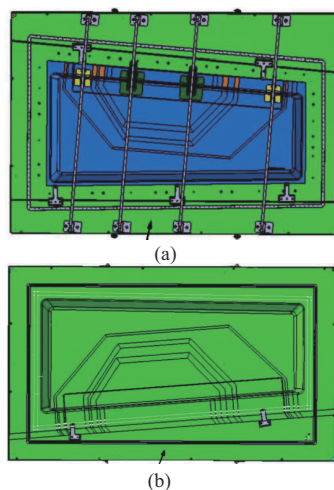
EW110C, I型1类,中航复合材料有限责任公司;

高温固化复合材料胶接用胶黏剂:SY-14M, II 型2类30级,北京航空材料研究院;

芳纶纸蜂窝芯材:NH-1-3.0-48,北京航空材料研究院。

1.3 扰流板零件成型工装

考虑到零件表面质量及型面精度要求高,分别选取上、下蒙皮贴模面为工装基准面。下蒙皮采用凹模工装结构,用于下蒙皮成型及蜂窝芯稳定化;上蒙皮平板工装兼做二次胶接成型夹具,金属接头安装区域设置检验卡板用于型面检测,四周设置挡块,工装材质均为殷钢,从而可以降低结构的固化变形,如图2所示。工装上带有激光定位系统的靶标位置孔、固化定位孔和数控铣切定位孔,靶标位置孔用于铺贴过程中预浸料及蜂窝芯定位,固化定位孔用于上下蒙皮二次胶接定位,数控铣切定位孔用于固化后零件数控加工定位。



a—上蒙皮工装;b—下蒙皮工装

图2 成型工装示意图

2 成型技术难点分析

全高度蜂窝夹层扰流板零件由于蜂窝芯厚度高、四周斜角大且型面下陷较多等特点,导致其固化成型和装配后零件内部质量及表面质量不易控制,主要体现在以下几方面。

(1)表面质量:扰流板蜂窝芯三个面斜角约45°,另外一个面斜角约80°,厚度达到98 mm,夹层组件在0.3 MPa固化压力下存在蜂窝芯收缩塌陷风险,导致零件表面质量不合格,外形超差。

(2)内部质量:选取扰流板组件的上、下蒙皮外表面为工装贴模面,二次胶接过程中蒙皮胶接面均为靠袋面,存在厚度累积、凹陷区域无法精确匹配

的情况;另外,蜂窝芯存在变R结构,难以通过数控程序加工到位,需与上下蒙皮组合时现场修配,蜂窝芯与蒙皮R角配合度不易掌握,因此难以保证组合件胶接质量。

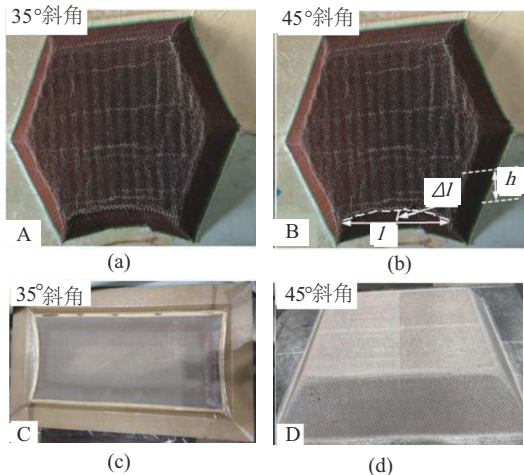
(3)质量:复合材料零件质量公差为 $\pm 8\%$,本体组件质量公差为 $\pm 4\%$ 。二次胶接过程中胶接面均为靠袋面,为保证蒙皮与蒙皮之间、蒙皮与蜂窝芯之间良好配合,局部区域需增加胶膜和发泡胶用量,导致组件质量容易超差。

(4)型面精度:零件上表面气动外形公差为 $-0.8\text{ mm}\sim+0.4\text{ mm}$;下表面气动外形公差为 $-1.5\text{ mm}\sim+0.8\text{ mm}$ 。扰流板零件尺寸大、刚性强,且存在蒙皮、胶膜与蜂窝芯在二次胶接过程中的相互作用,导致固化变形情况无法准确判断,型面存在超差风险。

3 蜂窝夹层扰流板零件制造过程分析

3.1 蜂窝芯稳定化研究

选取80 mm厚蜂窝芯为研究对象进行蜂窝芯稳定化试验,设置 35° 和 45° 两种斜角,设计正放和倒放两种放置方式,试验清单见表1,试验件实物图见图3。蜂窝芯稳定化处理过程:在蜂窝芯紧贴模具一侧铺贴一层SY-14M胶膜,封装制袋,在真空环境下升温至 180°C 保温3 h。



a— 35° 斜角正放;b— 45° 斜角正放;
c— 35° 斜角倒放;d— 45° 斜角倒放
图3 试验件实物图

表1 试验清单及检测结果

试验编号	试验名称	长或宽尺寸变化率/%	厚度方向变化率/%
A	35° 斜角正放	6.33	0.21
B	45° 斜角正放	8.29	0.19
C	35° 斜角倒放	1.49	0.24
D	45° 斜角倒放	0.58	0.19

(1)采用蜂窝芯正放的试验结果及分析。

A和B两组蜂窝芯长度或宽度方向均出现较明显的收缩,无法满足工程使用。蜂窝芯变形是由于侧向压力引起的蜂窝滑移^[12],蜂窝芯变形收缩过程如图4所示。

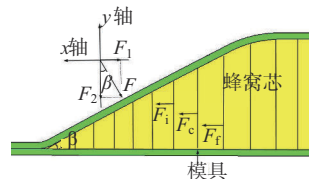


图4 正放蜂窝芯变形示意图

水平方向的合力 $F_{\text{合}}$ 可以表示为:

$$F_{\text{合}} = F_1 - F_i - F_e - F_f = F \times \sin \beta - F_i - F_e - F_f \quad (1)$$

式(1)中: F_i 为蜂窝内部压力, F_e 为蜂窝抗压强度, F_f 为芯材与面板或模具间的摩擦力, F 为外压, β 为蜂窝芯倾斜角。

当 $F_{\text{合}} < 0$ 时,蜂窝芯不会移动或塌陷。常规的蜂窝芯倾斜角一般控制在 25° 以下,固化压力一般为 0.3 MPa ,由公式(1)可知,当蜂窝芯倾斜角 β 增加时,容易导致蜂窝芯产生变形,试验结果说明倾斜角 β 为 35° 或 45° 时均会产生蜂窝芯收缩。因此针对该大厚度大斜角蜂窝芯,这种稳定化方案难以抑制蜂窝芯变形。

(2)采用蜂窝芯倒放的的试验结果及分析。

C组 35° 斜角蜂窝芯两端出现轻微的收缩,D组 45° 斜角蜂窝芯稳定化后未出现变形,零件形状保持良好。对这种情况进行原因分析,蜂窝芯变形收缩过程见图5。

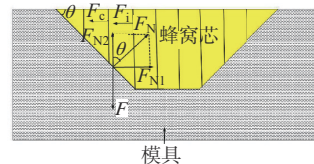


图5 倒置蜂窝芯变形示意图

水平方向的合力 $F_{\text{合}}$ 可以表示为:

$$F_{\text{合}} = F_i + F_e - F_{N1} = F_i + F_e - F_N \times \sin \theta \quad (2)$$

式(2)中: F_i 为蜂窝内部压力, F_e 为蜂窝抗压强度, F_N 为模具对蜂窝芯的支持力, F 为外压, θ 为蜂窝芯倾斜角。

理想状态下,当蜂窝芯与模具间完美贴合时, $F_{\text{合}} \leq 0$,蜂窝芯不会产生滑移或变形。因本试验中的 35° 蜂窝芯R角与模具间贴合不完全,蜂窝芯与模具

间存在微小间隙,致使模具对蜂窝芯支持力不足,依据公式(2),该情况会使蜂窝芯产生轻微变形。而提高 45° 蜂窝芯与模具间的贴合关系,蜂窝芯在模具内移动空间大大缩减,可以保证蜂窝芯的形状与尺寸稳定性。因此针对这种大厚度大斜角蜂窝芯,可通过将蜂窝芯倒置在模具内进行稳定化,在保证蜂窝芯与模具贴合度的情况下,可以获得形状及尺寸稳定的蜂窝芯。

综上所述, 35° 斜角和 45° 斜角已超出常规设计角度,采用倒放的方式可以实现蜂窝芯稳定化,提高其刚性,增大芯材在固化时抵抗变形的能力。

(3) 扰流板蜂窝芯稳定化。

基于局部试验件蜂窝芯稳定化结果,宽尺寸及大厚度扰流板蜂窝芯按照D组处理方式稳定化。将已固化的下蒙皮固定到工装上,放置隔离材料,在靠近工装一侧贴胶膜,按照材料固化参数进行蜂窝芯稳定化,最终获得形状及尺寸稳定的蜂窝芯,用于后续二次胶接成型。

3.2 下蒙皮工装形式研究

蜂窝夹层扰流板零件的下蒙皮为盆型结构,此类零件常用的成型方式包括凹模成型和凸模成型,表2为盆型蒙皮采用两种成型方式的优劣对比。鉴于下蒙皮对于表面质量与型面精度有较高要求,制造过程中选择凹模成型下蒙皮。

表2 盆型蒙皮结构成型工艺方法的优劣对比

成型工艺	优点	缺点
凸模成型	(1)因零件四周斜角较大,采用凸模成型,一方面便于现场铺贴操作,另一方面R角区域无损质量容易保证; (2)与蜂窝芯及上蒙皮之间的配合质量相对较好。	零件外表面质量较差,容易造成外形超差,影响后续装配
凹模成型	(1)下表面表面质量较好,气动外形公差容易保证; (2)因下蒙皮外表面一边存在不规则斜角,在工装上带出零件斜角区域的净边线,凹模成型后的下蒙皮表面印有斜角外形线,根据外形线手工铣切零件斜角,如图6所示; (3)采用凹模成型,二次胶接过程中,挡块与下蒙皮之间的配合质量更好。	(1)铺贴难度大,R角区域容易产生架桥现象,无损风险大; (2)胶接面为靠袋面存在厚度累积现象,与蜂窝芯及上蒙皮之间的胶接质量相对较差。

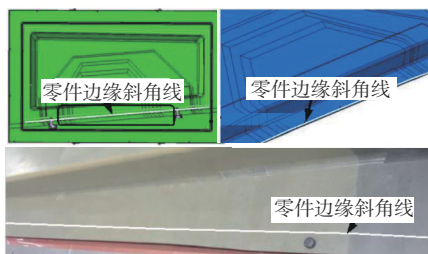


图6 凹模工装表面的零件斜角外形线

3.3 组件成型工艺方案

蜂窝夹层或泡沫夹层复合材料结构常用的成型工艺包括共固化、共胶接和二次胶接^[13-14]。共固化成型尽管工序少、芯材与其它次级件的胶接质量好,但是单个零件超差将会导致组件报废,成型风险大。共胶接成型虽可检查芯材与蒙皮表面配合情况,但是蜂窝夹层扰流板零件的蜂窝芯尺寸宽、厚度大、斜角大,组件成型风险较大,容易导致零件内部质量及表面质量超差。而上、下蒙皮预先单独固化成型,再与蜂窝芯二次胶接成型,工艺较为简单且蒙皮内部质量容易保证,并且可以通过提高蒙皮与蜂窝芯之间的配合程度提升产品质量^[15-16]。因此,笔者采用二次胶接成型方案,实施过程如下:选取合格的上下蒙皮及蜂窝芯,预装配蜂窝芯,根据预装结果手工修整R角区域;修配完成后,固定上蒙皮,在其表面铺贴一层胶膜,目视检查蜂窝芯与上蒙皮胶接面的配合情况并进行工艺补偿;根据蜂窝芯填胶样板在四个金属接头装配区域填充蜂窝填充胶,蜂窝芯四周斜面与下蒙皮接触区域填充发泡胶,芯上胶膜铺放及补偿措施与芯下类似;最后用定位销将上下蒙皮固定到工装上,下蒙皮四周放置挡块,制袋固化。组件脱模前将四个检验卡板安装到位进行型面检测,随后进行零件脱模、外形切割及修整等工序。

采用二次胶接成型工艺制造的试验件经超声检测无分层与脱黏现象;经X光检测,蜂窝芯加工及装配过程中未出现芯格断裂、破损等缺陷。试验结果表明,二次胶接过程中蜂窝芯与上下蒙皮之间配合良好,内部质量合格,符合设计要求。

3.4 组件质量控制

采用二次胶接工艺方案时,蒙皮胶接面均为靠袋面,存在厚度累积;同时为保证组合件胶接质量,在板板及板芯局部区域会铺贴多层胶膜及发泡胶,从而导致零件质量增加,引起超重。笔者从以下几方面对零组件质量进行控制:(1)金属接头装配区处需填充蜂窝填充胶,在满足装配需求的前提下尽量按下限尺寸进行填胶,减少蜂窝填充胶用量;(2)蜂窝芯加工前对其进行充分干燥,去除吸附的水分,另外提高蜂窝芯型面加工精度;(3)优化下料程序,尽量减少蒙皮铺贴过程中的搭接区域,提升蒙皮的表面质量,进而提高蒙皮与蜂窝芯之间的配合程度,减少胶膜及发泡胶用量。

结合上述几种措施,制造的试验件在零件状态及组合状态下质量公差分别控制在 $\pm 8\%$ 和 $\pm 4\%$ 范围内,满足设计质量公差要求。

3.5 型面精度控制

为保证零件的表面质量,选择上、下蒙皮外表面作为工装贴模面。试验件上表面气动外形公差为 $-0.8\text{ mm}\sim+0.4\text{ mm}$;下表面气动外形公差为 $-1.5\text{ mm}\sim+0.8\text{ mm}$;公差方向:制件外形超出理论外形为“+”,向理论外形内部偏移为“-”。金属接头装配区上下蒙皮理论厚度分别为 4.86 mm 和 5.41 mm ,蒙皮厚度公差为 $\pm 0.25\text{ mm}$;蜂窝芯理论厚度为 98 mm ,蜂窝芯厚度公差 $\pm 0.6\text{ mm}$,使得复材扰流板厚度公差范围达 $\pm 1.1\text{ mm}$ 。若按理论型面加工,无法满足装配精度要求,影响金属接头的安装。因此,需从装配角度统筹考虑,合理分配次级件的加工公差。

理论容差分配具体如下:下蒙皮凹模工装的底部型面公差按 $+0.2\text{ mm}\sim+0.4\text{ mm}$ 进行制造,其余型面公差按 $\pm 0.1\text{ mm}$ 进行制造;蜂窝芯厚度方向按 -0.4 mm 加工,厚度方向加工公差为 $\pm 0.25\text{ mm}$ 。根据理论分析进行试验件制造并完成型面检测,测量结果见图7和表3(卡板外形距零件理论外形为 3 mm ,卡板间隙合格范围为 $2.2\sim 4.5\text{ mm}$,测量点位按图7箭头方向进行测量)。从表3可以发现四个金属接头安装区域型面基本控制在 $-1.3\text{ mm}\sim-0.2\text{ mm}$,符合文件要求且满足装配需求。通过理论分析外加试验论证,该容差分配有效控制了蜂窝夹层扰流板零件的装配区型面精度。

另外,将组件放到成型胶接夹具上进行贴模间隙检查,实测贴模间隙为 0.6 mm ,符合设计指标要求。

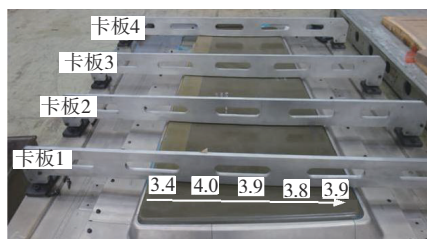


图7 固化后组件型面检测示意图

表3 固化后组件型面检测结果

卡板编号	实测间隙	最大间隙	最小间隙
卡板1	3.4, 4.0, 3.9, 3.8, 3.9	4.0	3.4
卡板2	3.7, 3.9, 4.3, 4.1, 4.2	4.3	3.7
卡板3	3.2, 4.0, 4.2, 4.0, 4.2	4.2	3.2
卡板4	4.2, 3.7, 3.5, 3.8, 4.0	4.2	3.5

4 结论

以宽尺寸、大厚度蜂窝夹层扰流板为研究对象,通过对其成型工艺设计方法及制造过程进行研究,得出如下结论:

(1)大厚度大斜角蜂窝芯可以通过倒放在模具内实现稳定化,提高芯材的刚性;

(2)选择上、下蒙皮的外表面作为工装贴模面,采用二次胶接成型工艺方法,制造的扰流板试验件超声检测、X光检测及贴模间隙数值均满足设计要求,同时型面精度满足装配需求;

(3)提高各次级件的加工质量,在满足装配要求的情况下尽量减少蜂窝填充胶用量,并对试验过程各个环节质量加以控制,使得最终制造的扰流板次级件及组件质量均满足设计要求。

参考文献

- [1] 万君,张杰,沈艳彬,等.三维有限元模拟大长径比闭口梁的固化过程及其变形预测[J].复合材料科学与工程,2023(1):63-69.
Wan Jun, Zhang Jie, Shen Yanbin, et al. Three dimensional finite element simulation of curing process and deformation prediction of closed beam with large aspect ratio[J]. Composites Science and Engineering, 2023(1):63-69.
- [2] 张丽,周杭生,黄金,等.聚合物梯度材料的构筑及性能研究[J].复合材料学报,2022,39(9):4 244-4 258.
Zhang Li, Zhou Hangsheng, Huang Jin, et al. Research progress on construction and properties of polymer gradient materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(9):4 244-4 258.
- [3] 郑秀云,熊晓松.ABS复合材料在汽车领域的应用研究进展[J].合成树脂及塑料,2022,39(5):82-86.
Zheng Xiuyun, Xiong Xiaosong. Research progress of ABS composite materials in automobile manufacturing[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2022, 39(5):82-86.
- [4] 吴志强,刘青霞,张欢唱,等.轻量化背景下改性塑料在汽车上的应用[J].工程塑料应用,2023,51(3):152-156.
Wu Zhiqiang, Liu Qingxia, Zhang Huanchang, et al. Application of modified plastics in automobile under light weight background[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(3):152-156.
- [5] 王凯,熊晨曦,贺强.超轻复合材料机翼结构设计及成型技术研究[J].复合材料科学与工程,2020(4):72-78.
Wang Kai, Xiong Chenxi, He Qiang. Research on the technology of structure design and forming of ultra-light composite wing[J]. Composites Science and Engineering, 2020(4):72-78.
- [6] 程文礼,袁超,邱启艳,等.航空用蜂窝夹层结构及制造工艺[J].航空制造技术,2015(7):94-98.
Cheng Wenli, Yuan Chao, Qiu Qiyang, et al. Honeycomb sandwich structure and manufacturing process in aviation industry[J]. Aero-

- nautical Manufacturing Technology, 2015(7):94-98.
- [7] 冯志海,李俊宁,田跃龙,等.航天先进复合材料研究进展[J].复合材料学报,2022,39(9):4 187-4 195.
Feng Zhihai, Li Junning, Tian Yuelong, et al. Research progress of advanced composite materials for aerospace applications[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2022, 39(9):4 187-4 195.
- [8] 袁超,李韶亮,陈静.复杂蜂窝夹层结构二次胶接校验精度影响因素研究[J].复合材料科学与工程,2020(5):95-99.
Yuan Chao, Li Shaoliang, Chen Jing. Research on the influence of secondary bonding verification accuracy of complex honeycomb sandwich structure[J]. Composites Science and Engineering, 2020 (5):95-99.
- [9] 苏君,孔琳,夏志平.温度和圆孔缺陷对层合板线性屈曲特性的影响分析[J].复合材料科学与工程,2021(2):77-83.
Su Jun, Kong Lin, Xia Zhiping. The influence analysis of temperature and circular-hole defect on the linear buckling of laminated plate[J]. Composites Science and Engineering, 2021(2):77-83.
- [10] 张旭艳.复合材料楔形蜂窝结构二次胶接技术研究[J].科技创
新导报,2019,16(12):16-18.
Zhang Xuyan. Research on secondary bonding technology of
composite wedge honeycomb structure[J]. Science and Technol-
ogy Innovation Herald, 2019, 16(12):16-18.
- [11] 柳敏静,武湛君.复合材料蜂窝夹层结构在飞机中的应用[J].科
技导报,2016,34(8):21-25.
Liu Minjing, Wu Zhanjun. Application of composite honeycomb
sandwich structure in aircraft[J]. Science & Technology Review,
2016, 34(8):21-25.
- [12] 杨羽飞,翟全胜,孙玺,等.蜂窝预成型法制造蜂窝夹层结构件
[J].高科技纤维与应用,2011,36(3):27-30,33.
Yang Yufei, Zhai Quansheng, Sun Xi, et al. Honeycomb
preformed curing methods manufacturing honeycomb sandwich
structure[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2011, 36(3):27-30, 33.
- [13] 段正才,郭绍华,冉安国.蜂窝夹层结构二次胶接技术研究[C]//
第17届全国复合材料学术会议论文集.中国航空学会.2012:
148-150.
Duan Zhengcai, Guo Shaohua, Ran Anguo. Research on second-
ary bonding technology of honeycomb sandwich structure[C]//
China Aviation Society. Proceedings of the 17th National Compos-
ite Materials Academic Conference. 2012:148-150.
- [14] 黄雪萌,成艳娜,白娅萍,等.夹层组件中蜂窝芯收缩控制技术
研究[J].粘接,2022,49(1):19-22.
Huang Xuemeng, Cheng Yanna, Bai Yaping, et al. Research on
honeycomb core contraction control technology in the mezzanine
component[J]. Adhesive, 2022, 49(1):19-22.
- [15] 袁超,张明.复合材料蜂窝夹层结构方向舵二次胶接成型技术
研究[J].科技与创新,2019(7):92-93.
Yuan Chao, Zhang Ming. Research on secondary bonding
molding technology of composite honeycomb sandwich structure
rudder[J]. Science and Technology & Innovation, 2019(7):92-93.
- [16] 刘志杰,张艳芳,刘安黎,等.配合间隙对蜂窝夹层结构板芯胶
接质量的影响与研究[J].复合材料科学与工程,2021(5):
104-109.
Liu Zhijie, Zhang Yanfang, Liu Anli, et al. Research on the effect
of the fit clearances on the skin/core bond of the honeycomb sand-
wich structure[J]. Composites Science and Engineering, 2021(5):
104-109.