

大飞机铝锂合金等直段研制 关键技术*

Key Technology of Al-Li Alloy Liner Part Development of Large Aircraft

中航工业江西洪都航空工业集团有限责任公司 宋利康 廖建华 郑堂介 张建东
南昌航空大学航空制造工程学院 朱永国



宋利康

工学博士,研究员级高工,中航工业江西洪都航空工业集团有限责任公司副总工程师、中国航空工业集团公司特级专家。江西省制造业信息化专家组组长、江西省计算机学会副理事长、江西省工程图学学会副理事长、南昌航空大学兼职教授。从事飞机研制数字化技术研究,曾任 L15 飞机型号总信息师,先后主持国家 863 计划、国防基础科研等项目,获多项省部级成果,2014 年获“2014 全国百佳首席信息官”称号。

结合等直段研制开展铝锂合金先进结构设计、分析方法及其验证技术研究,通过铝锂合金机身段典型铝锂合金结构件关键制造环节的工艺研究,突破铝锂合金机身典型结构件的高效、高品质加工制造技术,并验证先进装配工艺及机身部段件对接工艺方案,可为某大型客机机身结构大量采用铝锂合金奠定基础。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.04.082

铝锂合金是一种新型材料,通过加入 2%~3% 的锂,其密度减少 8%,刚性增加 15%,是一种强度高、弹性模量大的超轻型铝合金材料。第三代铝锂合金与其他铝合金相比较,最大的特点是重量轻,可减轻结构重量的 10%,而弹性模量却提高了 10%。其比强度和比刚度高、低温性能好,还具有良好的耐腐蚀性能和非常好的超塑性,同时还兼具低疲劳裂纹扩展速率、较好的高温及低温性能等特点,是最新型的航空铝合金材料,美国、加拿大等地区的材料制造商正在研制这种新型铝合金^[1-4]。我国研制的某大型客机前机身等直段主要采用第三代铝锂合金材料,当前亟待对第三代铝锂合金零件制造技术、先进装配技术等重大技术进行攻关,形成

具有自主知识产权的大型客机机身集成制造技术体系,满足我国大型客机的制造要求^[5]。为此,结合等直段研制开展铝锂合金先进结构设计、分析方法及其验证技术研究,通过铝锂合金机身段典型铝锂合金结构件关键制造环节的工艺研究,突破铝锂合金机身典型结构件的高效、高品质制造技术,并验证先进装配工艺及机身部段件对接工艺方案,可为某大型客机机身结构大量采用铝锂合金奠定基础。

前机身等直段研制关键技术

由于第三代铝锂合金添加了锂元素,使材料较为活泼,易腐蚀形成麻点。第三代铝锂合金的成形工艺技术、机械加工技术,特别是薄板数

* 江西省科技支撑计划(20133BBE50022, 20143ACE50008),江西省自然科学基金项目(20142BAB206023),江西省教育厅基金项目(GJJ14538)资助。

控加工技术的研究在国际上尚处于探索阶段。某大型客机等直段研制应解决的关键技术包括:第三代铝锂合金蒙皮滚弯成形、铝锂合金蒙皮数控加工技术、公差仿真应用技术和三维数字化工艺设计与仿真技术。

(1)第三代铝锂合金蒙皮滚弯成形。滚弯成形具有成形零件表面质量高、节约模具、工艺参数容易控制等优点,是单曲面蒙皮制造的主要工艺方法。第三代铝锂合金材料具有强度高、弹性模量高、成形困难等特征,因此,掌握铝锂合金滚弯技术,实现壁板蒙皮弯曲精确制造是大飞机等直段研制首要攻克的关键技术。

(2)大型铝锂合金蒙皮数控加工技术。传统的蒙皮下陷加工通常采用化铣工艺,但化铣工艺有着诸多的缺点:相对尺寸和厚度控制不易精确、表面质量较差、零件疲劳寿命合格但差异较大、加工周期较长且不环保。采用数控加工工艺则可以解决这些问题。由于蒙皮材料具有相应的厚度偏差,弯曲成形后校平也存在一定的曲度变形。因此,在保证数控铣切中蒙皮装夹合理的前提下,尽可能缩小公差,是蒙皮数控加工需解决的技术难点之一。此外,机身蒙皮厚度为1.6~2.4mm,要在蒙皮弹性变形阶段加工出蒙皮厚度20%~25%的下陷,是蒙皮数控加工需解决的另一技术难点。

(3)公差仿真应用技术。公差仿真是数字化协调技术的基础,是构建数字化协调技术体系的基石。大型客机制造装配质量要求更高、协调更严格,急需攻克面向飞机大部件的公差仿真技术,为解决数字化协调提供技术基础。利用公差仿真技术定量计算装配在某一个工位安装后,由于零件公差而产生的误差,对公差分配不合理部位提前预警,有利于更好地优化各部件的容差分配,优化整个部件的制造工艺。

(4)三维数字化工艺设计与仿

真技术。MBD技术是现代飞机设计的新技术之一,它将用于表达几何信息而非几何信息的数据按照一定的规则在同一个数模文件中表达^[6-7]。设计部门向制造单位提交的结果是涵盖丰富信息的三维数模,而不再发放晒蓝图纸。因此,利用MBD三维数模中的相关信息,开展工艺设计特别是装配工艺设计是飞机部件,也是铝锂合金等直段研制,必须解决关键技术之一。

关键技术解决方案

1 第三代铝锂合金蒙皮滚弯成形

由于第三代铝锂合金材料是在研新材料,需要对其进行过滚弯工艺试验,摸索材料成形性能,确定成形参数。蒙皮滚弯成形后会存在回弹,而蒙皮展平并真空吸附后外形又会发生变化。为了使蒙皮零件外形符合要求,在制造零件前进行大量蒙皮滚弯工艺试验,采用过滚弯工艺方法,即将零件滚弯成形弯曲半径小于零件理论外形弯曲半径,使零件回弹后其外形恢复到理论外形,摸索出滚弯回弹工艺参数,为后续蒙皮零件制造提供了技术参数。

采用AL-Li-S-4(镁铝)和2198-T8(加铝)两种第三代铝锂合金材料,研究其蒙皮滚弯工艺技术参数,首先通过试片级样件来摸索并获得其工艺参数后,再进行零件级的工艺参数验证。

2 大型薄蒙皮数控加工代替化铣

通过铝锂合金大型蒙皮数控加工代替化铣工艺研究,可以保证切削过程中的产品质量,同时优化控制结构件各部位的应力状态,实现大型结构件型面精确控制,降低制造成本,满足大型飞机延长寿命的要求。在环保节能方面,数控加工工艺比化铣工艺更优越。

2.1 试片级铝锂合金数控加工试验

在进行铝锂合金金属铣切性能研究中,从试片级开始,针对AL-Li-

S-4(镁铝)和2198-T8(加铝)两种第三代铝锂合金材料,研究其机械加工性能,验证刀具、加工参数以及切削液对铝锂合金表面质量的影响。主要试验内容包括:铝锂合金材料数控加工的转速、切屑量、进给量等切屑参数的选择;刀具材料、刀具结构、刀具夹持方式的选择;切削液以及冷却液的选择。

试验结果表明,数控加工能够满足蒙皮零件表面质量设计要求(即表面粗糙度值 $R_a \leq 3.2\text{mm}$),刀具可选择整体硬质合金2齿,使用热涨刀柄HSK63装夹,且经荧光渗透检查发现无隐性裂纹。

2.2 数控机加工工艺与化铣工艺对比

(1)铝锂合金大型蒙皮数控代替化铣技术。在利用试片级铝锂合金数控加工试验获得铝锂合金基本加工参数的基础上,选取等直段部件后段左侧下壁板以及后段左侧上壁板蒙皮零件进行工艺试验,研究铝锂合金大型蒙皮数控代替化铣技术。左侧下壁板蒙皮零件展开尺寸1020mm×2650mm,零件下料尺寸1100mm×2800mm,零件数控加工方法为:下料,对板料1200mm×3000mm按下料尺寸1100mm×2800mm下料,余料1200mm×200mm用于制造检验样板;蒙皮滚弯成形,将蒙皮按理论弧度滚弯成形($R=2000\text{mm}$),滚弯成形时应注意保护蒙皮表面,滚弯成形后按样板检验,记录成形后零件弧度的检验数据;真空吸附后进行数控加工,真空吸附时应注意保护蒙皮表面,数控加工完后,检验记录蒙皮铣切处的厚度值以及各铣切处的相对位置;再次按理论弧度滚弯校形($R=2000\text{mm}$),按数控样板检;记录弧面弧度值,待将数控加工完的零件进行滚弯校形,校形完成后,按数控样板检验记录弧面弧度值,并同时检验记录铣切处的相对位置以及检查铣切根部是否出现压痕、裂纹。

经检验,试验件加工精度能够

满足大飞机设计蒙皮下陷偏差为 $\pm 0.1\text{mm}$ 的精度要求。

3 基于三维模型的装配工艺设计与仿真应用

3.1 装配工艺仿真基本流程

等直段装配仍以手工装配方式为主,需要大量的专用工装,在工艺设计中需考虑装配的协调性、空间开敞性和工具可达性等。如图 1 所示,结合 DELMIA 的 DPE、DPM 模块应用方法,装配工艺设计基本工作流程按如下 6 个步骤进行。(1)产品分析:可视三维模型分析、调入 EBOM、构建 PBOM、工艺分工;(2)工艺定义:工艺方案确定、工艺参数选取、工艺模型建立;(3)工序流程:工艺顺序确定、装配约束选取、工艺装备选取;(4)AO 策划:AO 内容设计、组件数模关联、工装设计;(5)装配仿真:工装数模关联、装配流程及干涉仿真优化、工艺布局设计;(6)结果输出:仿真结果输出、AO 输出。

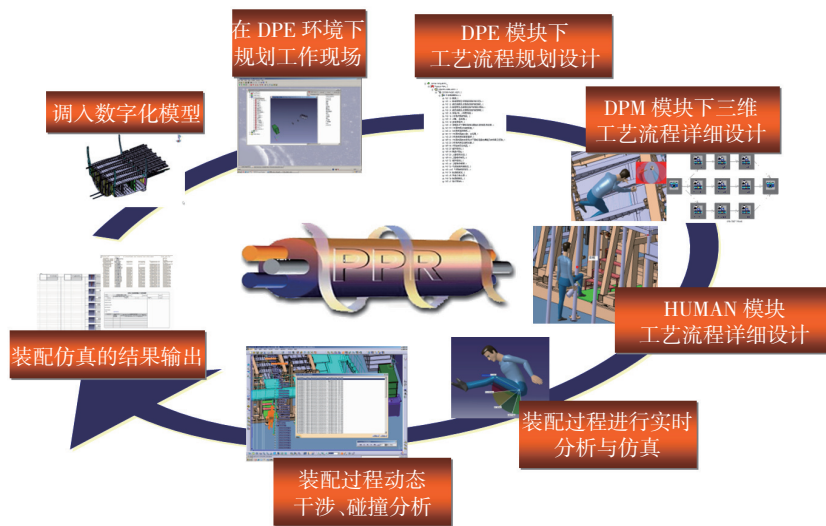


图 1 装配工艺设计及仿真工作基本流程

3.2 等直段装配工艺设计仿真技术实施

(1)装配工艺分离面划分。产品数据导入 DELMIA 中后,在三维环境下构建产品结构层次,实现工艺分离面划分,将结果保存在 DPE 服务器中,在 DPE 中 Product 节点下建立

IMBOM 节点,层级与 EBOM 并列,再将工艺分离面划分结果与之关联。

(2)装配工艺设计信息添加。二维工艺设计信息在 DPE、DPM 模块均可添加,主要内容包括结构介绍、工艺分析、零组件定位方法、交付要求、协调方法等信息;三维工艺设计信息仅能在 DPM 中添加,主要包括定位方法、交付要求等信息。

(3)AO 项目设计及参装零件指派。按工艺分离面区分,在各工位的工艺过程中建立 AO 项目,给定 AO 编号及名称,然后在可视环境下将部件/段件/组合件中的零件分配到 AO 中。

(4)连接件建模及指派。按工艺分离面创建工艺连接件模型 ERM,将设计的连接件信息通过关联粘贴添加到 ERM 中,创建旗注说明相应紧固件的连接对象,最后在 DELMIA-DPM 中将连接件指派到各自的 AO 中。

(5)装配仿真验证及优化。按《飞机数字化预装配通用要求》进行装配顺序仿真和评价,验证方案设计的合理性、可行性,产品装配顺序仿真通过零、组件指派和装配顺序设定来实现。具体的实施步骤如下:产品指派,装配顺序设定,装配顺序查看及

分析,装配路径仿真,人机工程仿真,干涉仿真,装配工艺优化等。

4 数字化公差仿真

公差仿真技术研究是对典型飞机结构关键协调部位的协调要求进行数字化工艺容差分配和分析。通过建立飞机零件关键协调部位公差特征、基于三维数字模型的公差模型和数字化技术的装配协调基准的制定方法,然后根据装配方案对设计图样提出的公差及工艺过程容差分配进行仿真优化、分析研究,验证其制造安装的有效性和可靠性,并根据仿真分析验证结果,调整、优化设计公差与工艺容差分配。优化装配顺序或装配基准,从而优化整个装配协调工艺,甚至可以减少或摒弃标准工装(量规、样件等),并为建立起高效可靠的数字化装配协调体系,以及数字化装配打下坚实的基础。通过在设计阶段对飞机制造过程各环节进行工艺容差的合理分配与仿真优化,分析对敏感区域的变形贡献者和几何影响因素。

关键技术研究成果应用

1 第三代铝锂合金零件制造技术

通过各项工艺试验得出的铝锂合金成形参数与典型铝合金如 2024、7075 等材料的成形参数进行对比,获得铝锂合金材料加工的基础工艺数据、零件制造性能和装配性能。某大型客机铝锂合金等直段蒙皮全部为单曲度蒙皮,蒙皮全部采用过滚弯成形方式,通过蒙皮过滚弯成形工艺试验,分析滚弯成形弯曲半径,实现了大型蒙皮的成形,蒙皮零件装配时与装配卡板间隙在 0.8mm 以内,如图 2 所示。

某大型客机铝锂合金等直段蒙皮段左 S6 ~ 右 S6 长桁蒙皮采用数控加工代替铣工艺,加工区域材料厚度公差在 $\pm 0.1\text{mm}$ 以下,表面粗糙度 $R_a=3.2\text{mm}$,如图 3 所示。

2 基于三维模型的等直段装配仿真

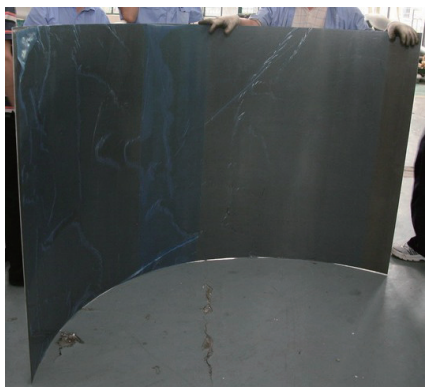


图2 蒙皮滚弯零件

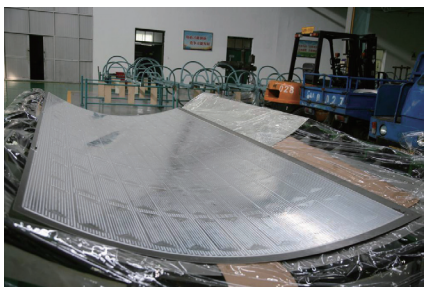


图3 数控加工代替铣工艺得到的蒙皮零件

对等直段装配工艺设计进行仿真案例研究,在等直段试验件初级工艺设计阶段,开展工艺分析、工艺方案制定、工装方案制定,工艺设计过程中及时与设计协调,针对产品设计不合理及产品干涉问题及时提出更改建议,设计部门根据反馈发出零、组件更改 664 项;同时结合部件装配协调方案的主供商评审意见,调整了 14 个浮框工艺分离方法及前、后段的上、下共 4 个半壁装配流程。

在等直段试验件的详细工艺设计阶段,结合指令的完善及归零工作,进行其余各组件的装配仿真工作。此外,基于三维模型的等直段装配工艺设计与仿真还达到了如下效果。

(1) 改变装配工艺设计工作模式。

利用装配仿真软件对飞机部件数模进行预装配,对工艺流程可行性、装配资源有效性、装配可达性等进行仿真和验证,以摆脱对物理样机及所涉及工艺装备的依赖,实现装配工艺设计的可视化和装配资源的显

性配置,如图 4 所示。

(2) 装配工艺设计结果更直观。

装配仿真最终形成的装配顺序可录制成动画视频,提供给现场作业人员作为操作指导。操作者不但能较容易掌握装配产品的装配工艺,而且在装配现场,能针对复杂装配工艺反复观摩装配仿真动画,实时纠正装配动作,使装配过程符合规范。

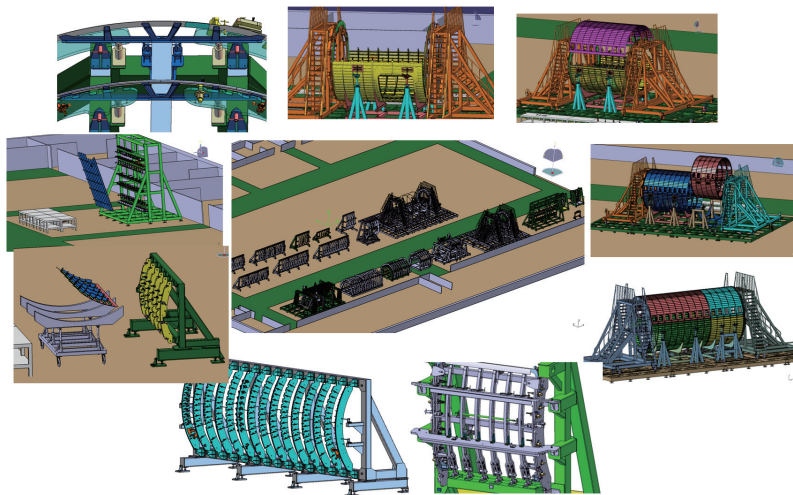


图4 等直段试验件装配仿真示意图

3 容差分配与仿真

基于 VSA 进行公差仿真,优化后机身各自装配工位上的装配工艺模型;以产品质量技术要求和机身对接技术要求,调整优化大飞机前机身等直段、后机身段在各个工位上,装配过程中定位基准、装配顺序、各制造环节公差大小等影响要素,确保了最终产品对接成功。

在以上关键技术研究 and 逐步应用的基础上,成功研制了前机身等直段样件。经检验,该等直段的技术参数完全满足设计要求,等直段样件的成功研制为我国大型飞机的研制打下了良好的基础。

结束语

通过对大型客机前机身等直段研制关键技术的研究,为某大型客机等直段铝锂合金零件制造技术和飞

机数字化装配技术应用提供了可靠的依据。

通过等直段的试制,验证了大型飞机机身铝锂合金典型钣金件制造工艺方法和机身典型结构装配工艺方案,为探索大型客机的研制流程积累了经验,也为大飞机的批量生产任务的完成奠定了良好的技术基础。

参考文献

- [1] 王浩军,史春玲,贾志强,等. 铝锂合金的发展及研究现状. 热加工工艺,2012,41(14): 82-84.
- [2] 孟晓敏,麻彦龙,黄伟九,等. 新型铝锂合金的微观组织及其在局部腐蚀中的作用. 材料导报,2014,28(7): 82-85.
- [3] 李劲凤,郑子樵,陈永来,等. 铝锂合金及其在航天工业上的应用. 宇航材料工艺,2012,(1): 13-15.
- [4] 孙中刚,郭旋,刘红兵,等. 铝锂合金先进制造技术及其发展趋势. 航空制造技术,2012,(5): 60-61.
- [5] 刘天骄,王永军,吴建军,等. 大型客机铝锂合金型材拉弯成形关键技术. 航空制造技术,2012,(17): 41-43.
- [6] 郑磊. 基于 MBD 三维工艺设计系统的开发与应用. 航空制造技术,2014(5): 51-54.
- [7] 巩玉强. 基于 MBD 的飞机三维数字化装配工艺设计与应用. 航空制造技术,2014,36(11): 103-104.

(责编 叶枫)