

飞机框肋类钣金零件智能制造 技术开发与应用

刘 闯¹, 史 航¹, 李仁花², 付 彬², 张 鑫³, 曾一畔⁴

(1. 西北工业大学机电学院, 西安 710072;

2. 航空工业江西洪都航空工业集团有限责任公司, 南昌 330024;

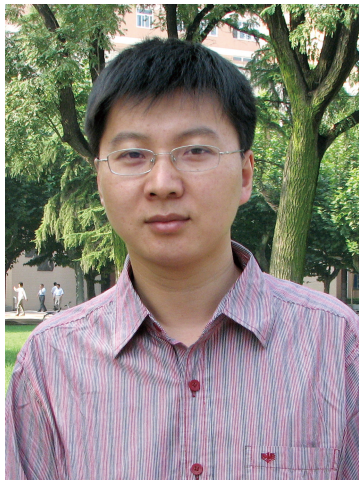
3. 航空工业沈阳飞机工业(集团)有限责任公司, 沈阳 110013;

4. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092)

[摘要] 针对飞机框肋类钣金零件的高效和高质量制造,提出了以知识库和制造模型定义为核心的智能制造技术开发思路,建立了模型驱动的智能化制造流程,根据应用目标设计了从分析、实施到应用的方案。该项技术已在航空工业洪都、沈飞和成飞开展了应用,首阶段验证结果表明零件外形、弯边角度、高度偏差均在精度要求范围之内,可进一步开展应用工作。

关键词: 智能制造;精密成形;制造模型;知识库;框肋零件

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.13.080



刘 闯

博士、副教授,研究方向为数字化制造与智能制造,针对航空航天钣金/复材件制造,对制造模型及其数字化定义技术、工艺智能设计方法与技术开展了深入研究,所研发的框肋类钣金件精确成形制造技术、飞机制造工艺知识库技术已在多个企业推广应用。

框肋类钣金零件(以下简称框肋零件)是飞机机体中的骨架类零件,占飞机钣金零件数量20%以上,大都位于机体尺寸和形状的控制截面上,担负着确定飞机外形和承受气动载荷的双重任务。框肋零件结构特征体现为腹板、弯边以及各结构要素之间的相互结合,弯边呈现为变曲率、变截面、带下陷和长桁缺口的结构,尺寸各异,最长可达3m以上;腹板带有减轻孔、加强槽、加强窝等结构要素。框肋零件工艺流程包括下料、成形、热处理、表面处理、校正、检验等主要工序,橡皮囊液压成形是其主要成形工艺。框肋零件成形精度由零件毛坯、回弹补偿量等参数共同决定。其中,回弹是影响框肋类钣金零件成形质量的主要问题。当前,型号产品研制中,零件制造效率和质量要求逐渐提高。为了使板料在卸载

后形状与所要求的零件形状一致,最有效的途径为预测并补偿回弹量以建立工艺模型,作为模具形状设计的依据^[1-2]。

然而,由于缺乏工艺知识积累和复杂模型回弹补偿技术,传统生产过程中主要以设计模型为依据设计和制造成形模具,采用“下料+成形+热处理+手工校形”的工艺方式,成形后需要大量的手工校形,周期长、表面质量不高,随着零件复杂度的提高和多个型号的并行生产,该工艺方式已逐渐达到极限。面向多型号产品快速、高质量研制和生产对企业现有制造工艺极限性能不断提出新的挑战,迫切需要构建高效精密成形的框肋类钣金零件智能制造技术体系。采用“下料+热处理+校平+成形”的“一步法”制造方式是适应成形质量和周期要求不断提高而必须采用

的制造方式,即在零件热处理后的新淬火状态成形,一步达到形状和性能要求。这要求面向制造全过程考虑回弹等工艺因素,根据设计模型对零件制造模型进行建模作为数控下料、成形模具设计的依据。实现框肋零件精密制造的关键是零件工艺过程数据的定量、准确计算。

以智能化为核心的高效精密制造是现代飞机研制的必然选择。近年来,利用成形过程的有限元模拟对钣金件成形预测与补偿中获得发展,代表性的方法包括:应力反向补偿法^[3]、节点几何位移补偿法^[4]、光顺补偿法^[5]和曲面控制过弯法^[6]等。要实现高效率、高精度数字化制造需解决两个问题:一是计算效率,取决于网络节点数量、补偿方向等因素,需反复迭代多次才能收敛;二是结果精度,目前几乎所有大型软件对复杂零件回弹数值模拟的误差和离散性都较大,预测精度仍较低^[7],仿真结果准确度通常与物理试验结果对比来确定。因此,不能将钣金件精密成形制造等同于成形过程数值模拟。在影响钣金件制造质量的诸多因素中,能够完全定量把握的并不多,承载标准数据、经验知识、试验数据、生产实例等内容的工艺知识库是解决工程问题的有效技术工具。有限元模拟软件可以买到,但作为企业知识积累和重用平台,决定了企业核心竞争力的制造数据库是不可能买来的^[8]。智能制造包含物质的和非物质的处理过程,不仅具有完善和快捷响应的物料供应链,还需要有稳定且强有力的知识供应链^[9]。高效精密制造需要参数准确的制造模型,才能真正实现对制造活动定量可控^[10]。从工程应用角度看,成形模拟技术可用于帮助人们深入了解成形过程,进行工艺过程趋势的预测,而要解决钣金件工艺稳定性和成形精度的问题,需要构建以工艺知识库为载体的技术体系,通过对工艺知识的管理和重用来精确定义框肋零件制造

模型。对于制造模型的建模,采用控制面处理方法来进行控制面的裁剪、截面线离散和回弹补偿,对于知识重用采用基于实例推理的方法重用经验数据以预测回弹量^[1]。

通过工程化开发框肋零件成形工艺知识库及应用、展开、回弹补偿工艺模型设计等技术和规范,并在航空主机厂中转化应用,以促进框肋零件从手工精校形向精密成形的智能化制造跨越,强化框肋零件成形技术创新发展的基础能力。本文介绍了框肋零件智能制造技术组成、开发思路、运行流程、知识获取和集成接口以及应用方案及实例。

技术开发思路

采用“下料+热处理+成形”的“一步法”成形实现框肋零件的精密成形,相应的制造过程包括框肋零件设计、工艺模型设计、成形模具设计、成形模具制造、液压成形和三维检测等主要环节。面向精密成形的框肋零件智能制造,关键在于补偿回弹变形以建立工艺模型用于成形模具设计。

1 技术组成

框肋零件智能制造技术是针对各种典型结构形式的复杂框肋类钣

金零件,以实现“一步法”精确成形为目标,以回弹补偿的成形工艺模型设计技术为核心,由框肋零件成形工艺知识库、基于CATIA二次开发的毛料展开工具、回弹补偿工具、工艺规范等共同组成,上述技术相结合才能实现零件在新淬火状态成形,一步达到形状和性能要求。所开发的框肋零件智能制造技术组成如图1所示。

2 运行流程

框肋零件成形后的变形主要为弯边回弹,成形后弯边的弯曲角度小于模具角度,对所有带弯边框肋零件均需补偿。凸缘型面与蒙皮搭接多为变曲率曲面,表现为弯边线曲率、弯边高度、弯曲角度沿弯边线不断变化,如图2所示,实际零件结构和尺寸多样,设备粗成形+手工校形的生产方式中并未体现出结构的差异性。要实现材料、结构和尺寸各异的框肋零件精密成形,其技术开发思路如下:

(1)针对不同材料、弯边角度、弯曲半径的截面线单元开展工艺试验,获取回弹补偿知识,并建立回弹补偿量智能预测技术。

(2)对于径向和周向不同弯边结构,探索建立回弹量智能化计算方法。

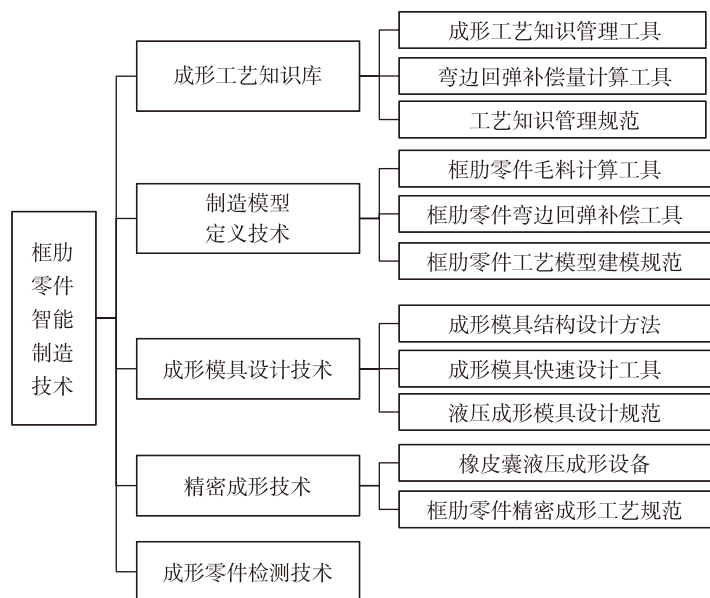


图1 框肋零件智能制造技术组成

Fig.1 Composition of intelligent manufacturing technology of aircraft frame and rib parts

(3)对于尺寸较大(1m以上)回弹所引起的腹板面翘曲,建立控制方案。

框肋零件智能制造技术运行流程如图3所示。根据一步法工艺过程,首先计算毛料和进行工艺模型建模,两项工作均使用专用软件工具和相应规范;其中基于知识库预测各截面的回弹补偿量;补偿完成后进行工艺模型建模,用于模具设计制造,使用补偿后模具进行一步法成形加工。

3 知识获取

如图4所示,采用QFC1.1×4-1400型橡皮囊液压机,分别针对不同厚度、弯曲半径的2024-O、2024-W、2024-T3、7075-O、7075-W和7075-T6铝合金板料开展弯曲成形试验,通过测量卸载后的试验件的回弹角度获取回弹补偿知识。

4 集成接口

框肋零件精密成形的关键在于弯边的回弹补偿,弯边回弹补偿中包括回弹计算和工艺模型设计,其中回弹计算采用知识库系统进行、工艺模

型建模基于CAD系统进行,因此,涉及两个系统之间对弯边几何数据的集成应用。如图5所示,采用基于XML的弯边几何数据表达方法进行集成应用。开发专用软件工具对框肋零件CAD模型离散、分段后以XML文件进行表达和导出。基于知识的回弹量预测工具导入弯边离散数据后进行回弹补偿计算,补充回弹后半径和角度的数据,以XML格式导出,在CAD中以专用数据导入工具读取,并进行曲面重构形成回弹补偿后的弯边控制面,经过工艺模型建模用于成形模具设计。

技术应用方案

1 应用目标

框肋零件智能制造技术的应用是增强企业制造能力的技术转移活动,是将框肋零件智能制造技术向框肋零件工艺性分析、工艺设计、工艺过程迅速地渗透和扩散,从而使框肋零件制造使能工具不断变革、框肋零件成形工艺知识不断共享、精密成形制造的对象不断扩大、劳动者素质不断提高,形成和构建一个全新的现代框肋零件精密成形制造技术体系,实现该类零件的快速、高质量制造。具

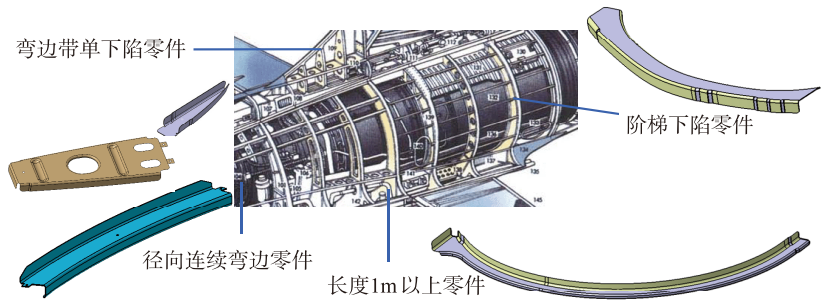


图2 框肋零件典型结构

Fig.2 Typical structure of aircraft frame and rib parts

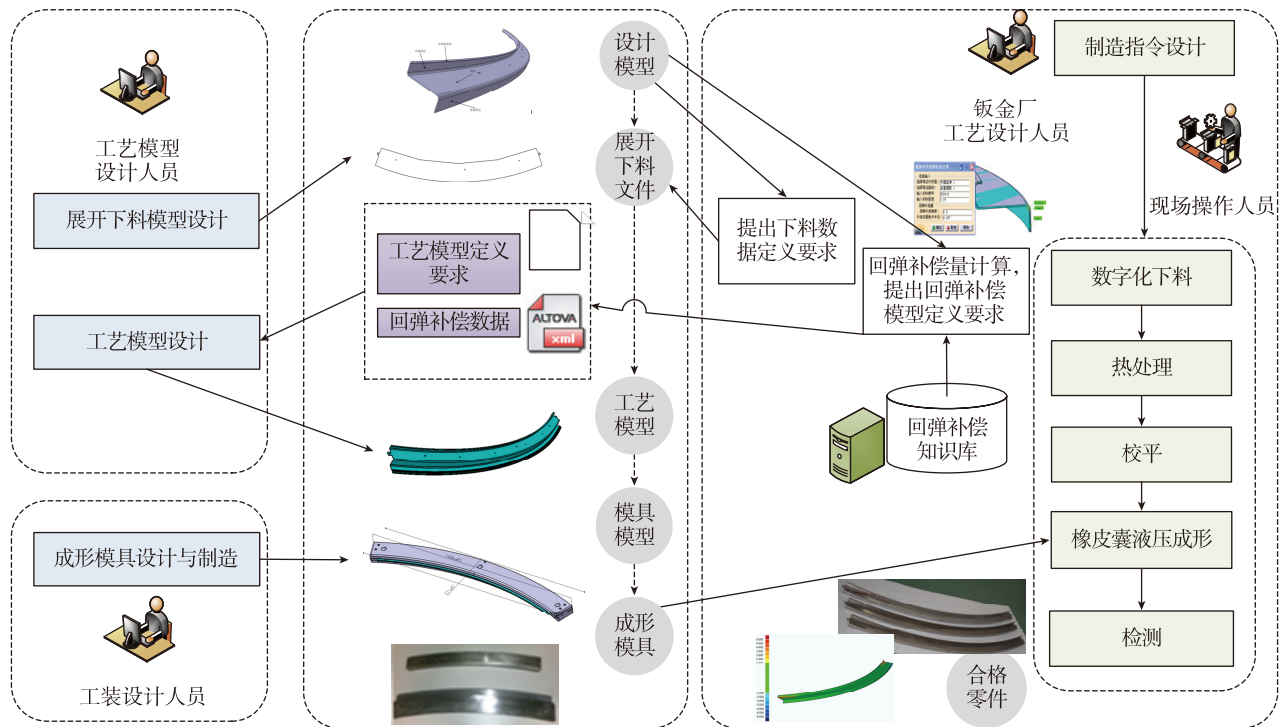


图3 框肋类钣金件智能制造流程

Fig.3 Flow of intelligent manufacturing of aircraft frame and rib parts

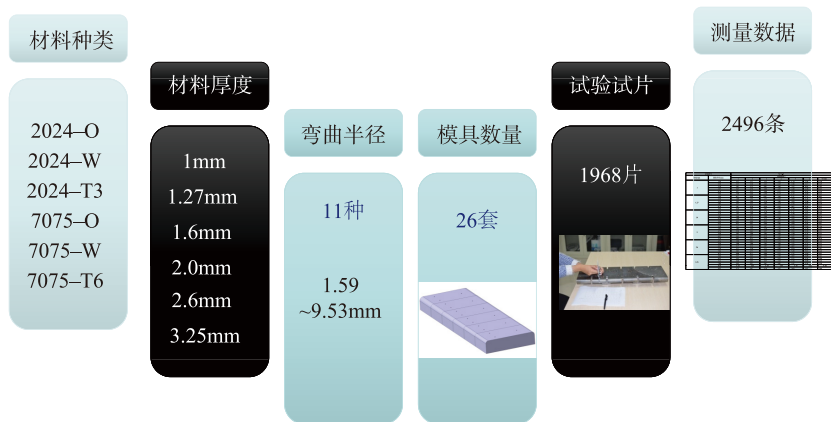


图4 框肋类弯边回弹补偿知识获取试验

Fig.4 Knowledge acquisition of springback compensation knowledge of aircraft frame and rib parts

体目标包括:

(1) 提高效率, 缩短框肋零件工艺设计和成形加工的周期, 通过准确的工艺参数、回弹补偿量和毛料数据, 减少试错次数。

(2) 提高质量, 减少框肋零件工艺设计更改和零件校形, 实现 80% 以上框肋类钣金零件实现精密成形, 提高精度并减少校形。

(3) 强化基础, 使企业工程技术人员经验知识和生产实践中积累的大量知识以数字化形式得到积累和重复使用。

2 应用路径

从总体上看, 钣金件制造技术正

处于升级阶段, 适应钣金件制造周期不断缩短和质量不断提高的要求, 框肋类钣金零件制造由经验型、反复试错的传统模式向高效、精密的智能制造模式发展, 而目前企业中普遍缺乏工艺知识的积累和有效重用。因此, 框肋类钣金零件智能制造技术的应用采用以技术转化为主, 辅以技术培训、咨询服务、技术指导的方式, 使企业建立起框肋零件智能制造技术体系, 强化框肋零件制造技术基础, 提高工艺人员的知识水平和技能, 改变框肋类钣金件制造的方式。

框肋零件智能制造技术应用总体实施过程是以钣金件数字化制造技

术评价和转化方法指导该技术的推广应用, 在框肋零件精密成形制造技术工程化开发完成之后分别进行试验验证、能力验证和工程应用, 在此过程中分别逐步进行该项技术成熟度的评价和提升, 依次达到在企业中可用、适用和实用的稳定技术状态。

2.1 分析阶段

开展技术预先评价与分析, 成立项目实施小组, 研究并评估企业的业务系统现状, 确定框肋类钣金零件智能制造技术实施的目标, 确定所采用的框肋零件精密成形制造技术范围, 对采用后现有技术变更范围、后期技术效果等加以衡量, 做出综合判断, 要求具体、明确, 提高技术转化的能力和科学化、规范化水平。

2.2 实施阶段

框肋零件智能制造的软件、规范和工艺方法的应用涉及回弹量计算、工程数据模型建模、成形模具设计、现场成形工艺过程控制、检测等多个方面。因此, 要保证其应用则需要企业级、部门级建立以制造模型为依据的运行流程和工艺规范, 用于贯彻执行实现精确成形的框肋零件制造流程, 再辅以软件工具的实施, 才能真正实现“一步法”精确成形, 使框肋零件智能制造技术达到好用状态。

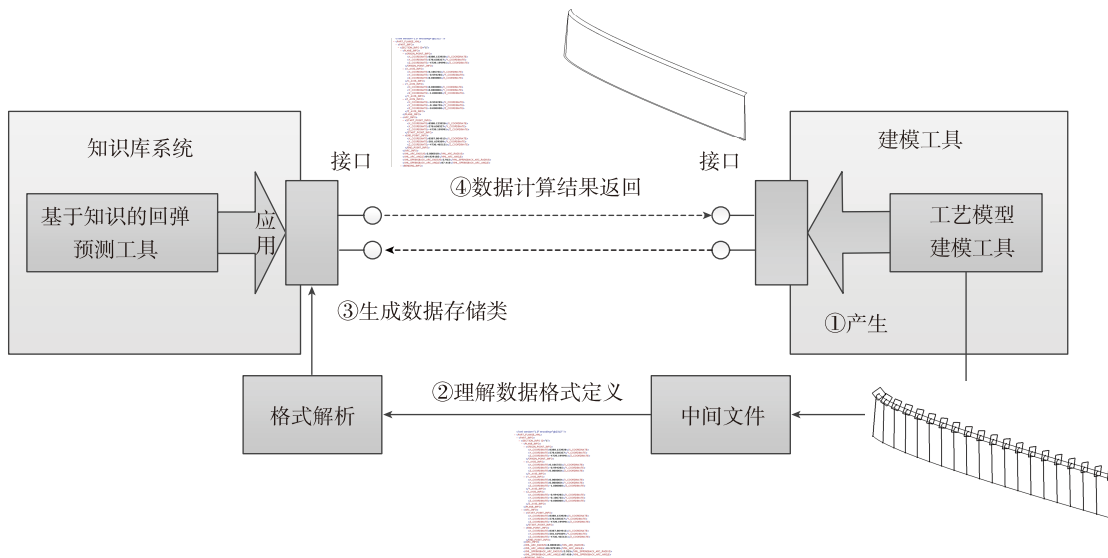


图5 基于XML的弯边几何信息集成应用

Fig.5 XML-based integration of geometrical information of flange

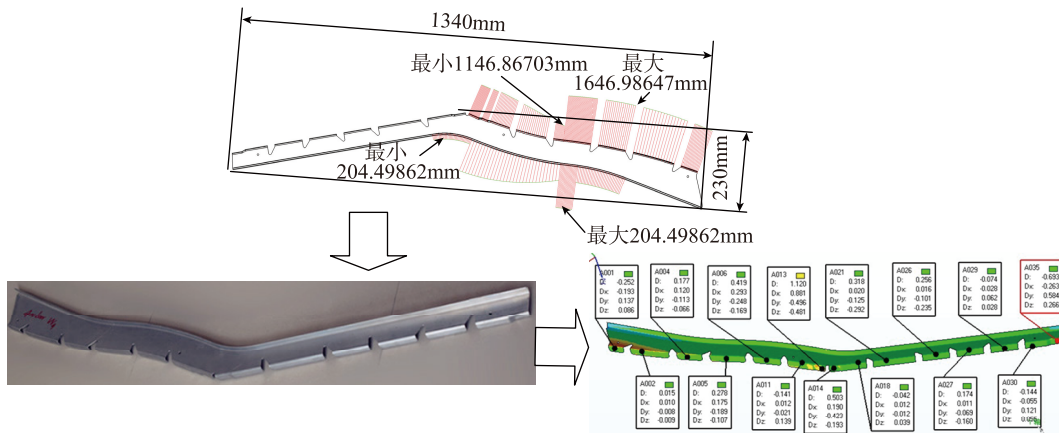


图6 实例框肋零件智能制造结果
Fig.6 The intelligent manufacturing result of example part

2.3 应用阶段

为了减少投资风险或新技术采用风险,企业进行小规模试用,对新技术在实际生产环境的运行效果进行全面试验验证和能力验证。(1)小规模试验验证,达到可用状态:选择框肋典型零件进行试验验证,以确认钣金件数字化制造技术的效果,根据试验结果对框肋零件精确成形技术体系进行评价和完善,并制定模型定义、数字化检测等工艺规范。(2)中规模能力验证,达到适用状态:以实际零件为对象进行生产,在企业技术体系中运行框肋零件精密成形制造技术,验证其先进性和可靠性,评价该技术是否达到适用的状态和一定的成熟度等级。(3)在生产中应用,达到实用状态:在型号产品中选取不同尺寸、不同结构的典型框肋类钣金零件,应用该技术体系,分析该制造技术运行的效果,评价该项技术是否达到实用的稳定技术状态。

3 制造案例

图6为试验验证选取的零件,具有弯边弯曲率、变截面,带阶梯下陷、端头下陷和长桁缺口等结构特点,零件材料为7B04,厚度为1.5mm,弯边外半径4.5mm,弯边角度在87.6°~90°之间,零件回弹补偿角度在1.14°~2.54°之间。经回弹补偿工艺模型设计成形模具,进行成形试验,成形压力 4×10^7 Pa。经数字化检

测分析,零件后外缘和内缘弯边弯曲角度偏差均在1°以内,内缘弯边角度平均偏差为0.254°,外缘弯边弯曲角度平均偏差为0.406°,外形偏差在0.5mm范围以内,达到了精密成形的效果。

结论

适应“中国制造2025”战略发展要求,国内航空制造技术水平要在2025年进入世界先进行列。作为一类飞机骨架零件,框肋类钣金零件外形结构复杂、尺寸各异,铝锂合金等新型轻质材料逐渐应用,必须开发和应用智能制造技术,改变传统依赖于手工校形的制造方式。该项技术开发难点在于针对不同材料、结构、尺寸的零件,要分别建立以知识库为基础的展开、回弹补偿、模具设计等解决方案;应用难点在于,其不仅仅是软件工具和规范的实施,而且涉及制造流程和相应工艺规范的变革。本文所开发的技术,在前期小规模试验验证中取得了良好效果,并在此基础上进行完善,达到了可用状态;目前正在开展能力验证工作,其进一步推广转化将推动飞机钣金件制造技术向高效、高质量的智能化方向发展。

参考文献

[1] LIU C, WU H B, YANG Y M, et al. A rapid and intelligent approach to design

forming shape model for precise manufacturing of flanged part[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(9-12): 3121-3134.

[2] ZHANG Z K, WU J J, ZHANG S, et al. A new iterative method for springback control based on theory analysis and displacement adjustment[J]. International Journal of Mechanical Science, 2016, 105: 330-339.

[3] KARAFILLIS A P, BOYCE M C. Tooling and binder design for sheet metal forming processes compensating springback error[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1996, 36(4): 503-526.

[4] GAN W, WAGONER R H. Die design method for sheet springback[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2004, 46(7): 1097-1113.

[5] WEIHER J, RIETMAN B, KOSE K, et al. Controlling springback with compensation strategies[C]//AIP Conference Proceedings, Columbus, 2004.

[6] LINGBEEK R, HUETINK J, OHNIMUS S, et al. The development of a finite elements based springback compensation tool for sheet metal products[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 169(1): 115-125.

[7] 李光耀,王琥,杨旭静,等. 板料冲压成形工艺与模具设计制造中的若干前沿技术[J]. 机械工程学报, 2010, 46(10): 31-39.

LI Guangyao, WANG Hu, YANG Xujing, et al. Some new topics on process design and mould manufacture for sheet metal forming[J]. Journal of Mechanical of Engineering, 2010,

(下转第100页)

Study on Angular Contraction of Carbon Fiber Composite U-Shaped Component and Its Mould Compensation

YU Yonghong, LIU Zhaopeng, SHANG Yanghong, YANG Jingwen, LI Zeying
(Jiangsu Hengshen Co., Ltd., Danyang 212314, China)

[ABSTRACT] In this paper, U-shaped components of carbon fiber composite with two different-height flange slabs are studied. Autoclave moulding process and VARIM process are used to prepare the U-shaped components. The U-shaped component angular contraction conditions are studied by measuring their angle. And based on the measurement results, the mould compensation angle is optimized and redesigned. The angular contraction conditions of the U-shaped components made by the two above-mentioned processes are different. When designing the compensation angle of the U-shaped component mould, it is impossible to generalize all the moulds used in different molding processes and we should treat them differently according to the molding process characteristics. In addition, for the U-shaped components with two different-height flange slabs, whichever kind of molding process they are made by, the degree of angular contraction on the high flange slab side is smaller than that of on the lower flange slab side. When designing the compensation angle of the U-shaped component mould, this distinction should not be neglected.

Keywords: Carbon fiber composite; U-shaped component; Angular contraction; Mould; Compensation angle

(责编 铃兰)

(上接第 84 页)

46(10): 31-39.

[8] 刘闯. 钣金件数字化制造数据库工程技术应用案例集 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.

LIU Chuang. Cases of digital manufacturing database engineering technology for sheet metal parts[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.

[9] 张曙. 工业 4.0 和智能制造 [J]. 机械设计与制造工程, 2014, 43(8): 1-5.

ZHANG Shu. The Industry 4.0 and intelligent manufacturing[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2014, 43(8): 1-5.

[10] 范玉斌, 刘闯, 吴红兵, 等. 全三维模型驱动的复杂产品智能制造 [J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(6): 1176-1186.

FAN Yubin, LIU Chuang, WU Hongbing, et al. Intelligent complex product manufacturing driven by complete three-dimensional model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(6): 1176-1186.

通讯作者: 刘闯, E-mail: liuchuang@nwpu.edu.cn.

Development and Application of Intelligent Manufacturing Technology of Aircraft Frame and Rib Parts

LIU Chuang¹, SHI Hang¹, LI Renhua², FU Bin², ZHANG Xin³, ZENG Yipan⁴

(1. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Industry Group Co., Ltd., Nanchang 330024, China;

3. AVIC Shenyang Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Shenyang 110013, China;

4. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

[ABSTRACT] To manufacture the aircraft frame and rib parts rapidly and precisely, the approach of intelligent manufacturing technology development is proposed from the viewpoints of knowledge base and manufacturing model, and the intelligent manufacturing flow is established. The scheme from technology analysis, implementation to application is designed according to the application target. The technology has been applied in AVIC corporations of Hongdu, Shenyang and Chengdu. The test result shows that the forming accuracy of outer shape, flange angle and height is improved significantly and precise forming is achieved. The technology can be further applied in the future.

Keywords: Intelligent manufacturing; Precise forming; Manufacturing model; Knowledge base; Frame and rib part

(责编 文竹)