

超薄铝合金钣金零件成形技术探讨

Studies on Forming Techniques of Ultra-Thin Aluminum Alloy Sheet Metal Parts

中航工业贵州飞机有限责任公司 金宝晨 裴华林

[摘要] 某型飞机机体结构蒙皮零件大量采用厚度为 δ 0.5~0.6mm 的超薄铝合金材料。本文从该机型研制到批生产,对蒙皮构件超薄材料的成形加工、材料的热处理、铆接装配、材料及零件的搬运等方面存在的问题,从材料的成形工艺技术和质量控制等方面提出一些探讨性的建议和措施。

关键词: 超薄材料 成形 拉伸 变形

[ABSTRACT] The ultra-thin aluminum alloy sheet metal material which has a thickness of 0.5-0.6 millimeters is widely used in airframe skin components of an aircraft. As for the existing problem of ultra-thin material skin components, such as high difficulty in forming, large deformation in heat treatment, poor assembly quality in riveting and easy deformation in handling, this paper gives some suggestions and solutions from the aspects of material forming process and quality control during the development of this type of aircraft.

Keywords: Ultra-thin material Forming Stretching Deformation

近几年来,随着我国系列无人机的研制和开发,为使飞机上安装更多的机载设备和相关成品,提高飞机的有效载荷和续航时间,又不致使飞机的整体重量过重,飞机就须进行减重。而无人机的减重只能在飞机平台(机体结构)上进行,因此某型机系列飞机在结构设计上大量使用了超薄铝合金构件。其中,钣金结构件厚度都在 0.5~1.5mm 之间,而蒙皮构件厚度为 0.5~0.6mm。

公司多年来一直生产某系列歼击飞机的钣金零件,零件的厚度绝大多数都在 1.2~3.5mm 之间,无论是设备、成形技术还是操作技能的研究都集中在厚板上(相对于超薄板来说是厚板),而超薄板材料的成形技术及操作技能从未涉足,也无可借鉴和参考的相关资料。因此,解决超薄材料的成形及相关关键因素的问题,对今后贵飞公司的发展有着重要的意义。

1 超薄材料成形存在的问题及技术关键

从某型机系列飞机的研制生产过程可以看出,超薄材料处处显示出它的特殊性及其特殊性而引发的特

殊问题,例如:

- (1) 材料在成形中易出现鼓动、起死皱或拉裂;
- (2) 工件在切边时产生波纹;
- (3) 工件校平、修整困难;
- (4) 材料、零件刚性很差,搬运过程中易产生折痕;
- (5) 铆装过程中,铆接的部位不平整,出现鼓包;
- (6) 非铆接区域因材料松动而引起鼓动,致使机体外形表面存在严重的质量问题。

因此,解决超薄材料成形方面存在的问题,提高零件加工质量,是解决某型机系列机体结构制造的关键技术。

2 问题分析

2.1 超薄材料成形工艺性分析

金属材料的成形是通过材料的塑性变形来实现的,材料的塑性越好,其冷变形加工的性能就越好,材料的成形性能就越好。金属材料的塑性变形是通过金属晶体内部晶格之间的相对滑动来实现的,这是金属材料塑性变形的最主要方式。金属晶体内部晶格之间相对滑动的面(称为滑移面)越多,材料的变形量就越大,成形的工艺性就越好,适用于外形结构复杂的构件成形。在同一种状态下,材料越薄,晶体内部晶格之间相对滑动的面(滑移面)就越少,材料的变形量就越小,成形的工艺性就越差,适用于成形外形结构简单的构件。如果材料的变形量稍有增大,因为材料太薄,变形过程中材料受压缩的部位极易失稳而产生死皱,材料受拉伸的部位则容易被拉裂。因此,超薄材料成形工艺性与厚板材料成形工艺性相比,差异很大。

2.2 原材料性能对成形影响的分析

从原材料性能方面来看,板材都是通过冶炼的铸锭经轧制而成,在材料的加工过程中,材料的内部或多或少都残留有一定量的内应力,并将其称为第一残余应力。残余应力的大小将决定加工过程中工件产生变形的大小,是工件冷加工变形的一大主要因素。

对于板材而言,板材在变形前,残余应力的大小和分布是相对均匀的,板材经变形后,残余应力的大小和分布在材料内部将发生改变,以致造成钣金构件在成形后出现扭曲、边缘松动、腹板鼓动等变形现象。对于厚

板来说,因材料较厚,刚性强,材料抗变形的能力强,残余应力难以使材料产生上述的变形现象,即使出现,也很微弱。而对于超薄板材料来说就截然不同,因材料太薄,刚性很差,抗变形的能力非常弱,因此,对残余应力变化非常敏感,只要应力发生改变,应力引起的变形就会出现,并且非常明显。同时,由于材料的刚性很差,搬运过程中稍不注意,就会使材料出现“马蹄印”的折痕。

2.3 热处理(淬火)过程产生的影响

热处理(淬火)过程都会使工件产生变形,这是由于材料内部组织发生改变或操作不当而引起的。前者引起的变形无法避免,而后者引起的变形则可以控制,并能够通过校正、修整或留加工余量,在后续的加工过程中予以消除。对于薄板构件热处理产生的变形来说,如果产生的变形过大,工件在淬火后能够校正、修整的变形量很小,其变形就很难消除。材料越薄,产生的淬火变形就越严重,并难以消除,这也是为何在某飞机研制中大量采用 CZ 料的原因。

2.4 现有的加工能力和工艺技术

公司对飞机钣金结构件的加工制造,一直采用的是传统工艺技术的加工方法。对超薄材料钣金结构件的成形技术,看似是对传统制造工艺技术的深化,却包含着许多新工艺和新技术。由于没有相关的技术资料可以参考和借鉴,这就需要在实践中通过工程技术人员去进行深入的探索和研究,并加以掌握。

3 解决措施

针对公司某型机系列飞机机体超薄材料结构件,在加工成形方面存在较多的技术问题和难度,又无现成的技术资料可供借鉴,根据公司现有的加工条件和技术能力,只能在传统加工工艺的方法上,通过大量的工艺试验进行摸索,找出合适的加工工艺,探索合理的工艺参数,以保证研制阶段的机体结构件的制造满足和达到设计技术状态要求。

现结合钣金成形工艺技术方面的实践,对上述存在问题的解决措施谈一点认识和看法。

3.1 钣金成形设备的更新

钣金加工对设备的依赖性较强,新工艺、新技术的应用必须以先进的加工设备作为依托,如钣金成形机、数控蒙皮拉伸机、数控折弯机、液压橡皮成形机等。在利用先进设备的同时,结合材料的机械性能,确定合理的工艺参数,辅与人工修型,就能获得符合图纸尺寸要求的零件。目前公司现有设备都是 20 世纪五六十年代的产品,设备老化严重,性能和精度已减弱到了极限。如果不对这些设备进行更新换代,公司加工制造工艺技术方面的创新和进步将受到严重制约,公司加工能力也

将受到严重影响。

3.1.1 钣金成形机

钣金成形机是钣金成形加工生产中非常重要和不可缺少的辅助加工设备。钣金成形机的主要功能是对板材在加工中进行收料和放料,同时还具备一定的成形功能。其优点是带有无齿的收放模头,不仅能对成形工件的边缘材料进行收放,对工件内部一定位置的材料也能进行收放,同时还能对成形后的双曲度零件曲面部位的材料进行收放。而公司现有的收边机只能对零件边缘以外的材料进行收料,无放料功能,更不能在零件内部进行收料。因此,在钣金构件成形过程中,钣金成形机对成形零件进行辅助加工和修整,提高零件的成形质量,起着非常重要的作用。如果有了钣金成形机,结合在超薄材料成形中确定的合理工艺参数,相信存在的问题都能够得到一定的解决。

3.1.2 数控蒙皮拉伸机

数控蒙皮拉伸机的特点是:蒙皮拉伸的变形量、拉力大小、钳口角度和方向等都通过编程由设备计算机控制。同时,拉伸机工作台的上方配有压力头,成形中可进行拉压结合,使蒙皮成形的质量得到极大提高。数控蒙皮拉伸机特别适于加工外形结构比较复杂的蒙皮零件,如进气道蒙皮、翼身融合的 S 型等类型的蒙皮零件。当然,先进的设备也需要综合确定合理的工艺参数。

3.1.3 数控折弯机

数控折弯机是用于钣金件折弯的专用设备。工作时,将折弯件的几何参数(如弯边尺寸、折弯角度及圆角半径等)输入设备计算机,通过操作完成零件的折弯成型。折弯件的几何尺寸精度虽然全由设备保证,但仍然需要依据不同材料、不同炉批号、不同半径的情况进行试压,调整工艺参数。而公司现有的折弯机是上海锻压机床厂 60 年代的老产品,设备老化严重,故障率高,液压系统渗漏严重,零件加工的尺寸精度和质量难以保证,且费工费力。

3.1.4 大吨位液压橡皮成形机

液压橡皮成形机是飞机钣金生产中的专用设备,其生产效率高,零件加工精度和表面质量好。企业现有的 9600 吨橡皮成形机也是服役 40 多年的老设备,故障率高,设备能力严重不足。因此,更新大吨位橡皮成形机对钣金零件的加工有非常重要的作用。

3.2 减小热处理产生的变形

热处理过程中,因材料内部组织的改变引起的变形是无法避免的,而因操作方法不当引起的变形是可以控制的,因此,在超薄材料零件热处理过程中,应摸索一套正确的操作方法,使零件热处理产生的变形达到最小,以便于消除。

为了在热处理中减小材料或工件因操作不当而引起的变形,应从以下几方面加以考虑和注意。

(1) 工件装框时,应根据工件的外部形状,合理装卡、捆绑,且装夹、捆绑力度要适中。因为工件在高温的硝盐槽中,材料变得像面条一样柔软,力度过大,装卡、捆绑处会造成严重变形;装卡、捆绑过松、不牢,材料自重会引起材料窝折在一起,形成严重变形,无法消除。

(2) 减小工件在进出硝盐槽时槽液对工件的阻力。由于硝盐熔液的密度较大,阻力也较大,因此,工件装卡的位置方向应有利于槽液的流动,以减小工件进出槽液时的阻力,以及由此引起的变形。

(3) 多个或多项工件一起进行热处理时,应保证工件之间有足够的距离。因出炉后的高温工件在进入水槽淬火时,工件与水面接触的瞬间会使水汽化而产生较大的膨胀压力,工件靠得太近则造成压力排泄不畅和缓冲不够,易造成工件产生大面积的淬火鼓包。

(4) 热处理装具品种多样化和专用化,以适应工件外形结构变化的要求,便于工件得到较好的、合理的装卡定位和捆绑束缚,使其变形能得到有效控制。如只需一次拉伸成形的蒙皮零件和进行预拉伸处理的材料,可将淬火框做成圆筒形,材料淬火前也先滚制成筒形,并围着淬火框进行装卡、捆绑。其优点是:材料的刚性得到加强,提高了抗变形能力;材料受装卡、捆绑束缚的范围增加,使材料淬火时变形受到较大限制,减小变形。

3.3 对材料进行预拉伸处理

材料进行预拉伸处理的目的主要有两方面:一是能在较大程度上消除材料内部的残余应力,二是提高材料的刚性和屈服强度。目前国内尚无预拉伸薄板材料的生产厂家,只能将材料通过蒙皮拉伸机在单曲度很小的模胎上(长 2500mm,弦高 2~3mm)进行预拉伸处理,即将 M 状态材料在新淬火状态下,或用 CZ 料再经淬火后,通过蒙皮拉伸机使材料产生一定拉伸变形,以消除材料内部的残余应力。从拉伸变形量与残余应力关系图(图 1)看出,材料经拉伸变形后,在很大程度上消除了材料内部残余应力。同时,材料经过变形产生了一定的冷作硬化,使材料的刚性和抗屈服能力得到一定程度的提高,从而最大限度地减小了材料在成形过程中因刚性不足和残余应力的变化而引起的非变形区域的变形。

材料(LY12 结构板)预拉伸应注意两个方面:

(1) 预拉伸应在材料淬火后 1 小时(夏季)或 1.5 小时(冬季)内进行,此时限内材料的塑性较好,适于中等变形程度的加工。因为在此阶段,材料处于淬火状态的“孕育期”,时效的速度非常缓慢;超过此时限,时效的速度急剧加快,材料的强度、硬度提高很快,且塑性急剧下降,变形就比较困难。若变形过小,预拉伸处理所起

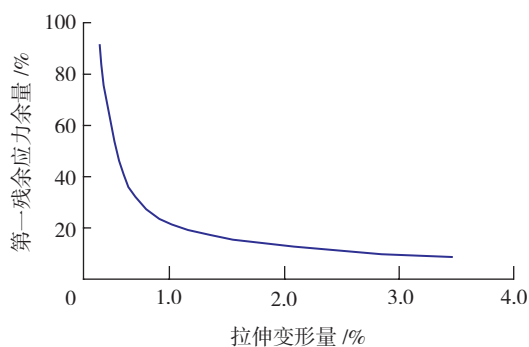


图1 拉伸变形量与第一残余应力关系图
Fig.1 Diagram of tensile deformation and the first residual stress

作用不大,而变形过大又容易将材料拉裂。

(2) 要控制好热处理时的变形缺陷。因预拉伸处理的变形量一般都较小,如果材料变形缺陷过大,拉伸处理中就很难排除。

材料预拉伸处理中,应根据材料在后续成形过程中变形程度的大小确定和控制预拉伸变形量的大小,以保证零件加工的成形质量。经预拉伸处理后的材料适用于机翼蒙皮、襟翼蒙皮、尾翼蒙皮和一部分机身蒙皮等在成形中材料变形量不大的零件加工。

3.4 建立叉车、搬运箱架系统

由于超薄材料成形的钣金构件(特别是蒙皮构件)刚性太弱,抗屈服能力差,在搬运过程中(即从原材料库房领料到零件交付装卸的全过程,见图 2)稍不注意就会使材料或零件产生“马蹄印”的折痕。

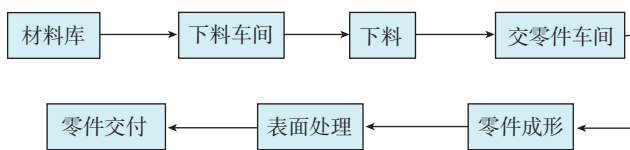


图2 搬运流程图
Fig.2 Handling flow chart

从图 2 中可以看出,从领料到零件交付之间的所有环节都要由人工进行搬运和装卸,难免不出意外。因此,为了减少材料在加工过程中和零件交付搬运时的问题,应建立手动叉车、搬运箱架系统,尽可能减少人为搬运。

3.5 技术培训

针对超薄材料在成形中存在的较多变形缺陷(比较典型的是鼓动、鼓包和边缘松动而产生波纹),必须通过钣金操作技术工人的修校予以消除。这些缺陷消除得不好、不彻底,零件在铆装过程中就会产生铆接鼓包,且鼓动现象依然存在,甚至可能加剧。因此,应通过不同渠道对钣金操作人员进行技能方面的技术培训和训练,

(下转第 97 页)

多个有向图表示装配单元之间的装配定位关系。从图4可以看出,同层的多个虚线围成的装配单元之间是独立、不相互干涉的。

本文采用邻接矩阵表示法来存储分层模型中的各类信息。本邻接矩阵使用2个数组:一个是一维数组,用来存储装配模型中装配单元组成的结点及其顺序;另一个是上三角矩阵,用来存储装配模型中结点之间的连接关系。如果结点之间的连接关系为层级关系,则对应数组元素之值为2;如果结点之间的连接关系为有向定位关系,则对应数组元素之值为 ± 1 ;如果结点之间不存在任何连接关系,则对应数组元素之值为0。

一维数组 $A[n]$ 的构建方法:按照从上到下、同父结点优先的原则,将引入阶段装配模型的结点作为一维数组 $A[n]$ 元素, n 表示结点数。以图4为例,结点名称、结点在数组 $A[14]$ 中的编号、结点对应的数组元素见表1。

表1 一维数组元素对照表

装配单元信息	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7
对应元素	$A[0]$	$A[1]$	$A[2]$	$A[3]$	$A[4]$	$A[5]$	$A[6]$
节点编号	0	1	2	3	4	5	6
装配单元信息	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}
对应元素	$A[7]$	$A[8]$	$A[9]$	$A[10]$	$A[11]$	$A[12]$	$A[13]$
节点编号	7	8	9	10	11	12	13

二维数组 $B_1[n][n]$ 的构造方法是:

$$B_1[n][n] = \begin{cases} \pm 2 & \text{当}(A_1[i], A_1[j])\text{之间有有向连接} \\ & \text{关系时,正向取2,反向取}-2; \\ 1 & \text{当}(A_1[i], A_1[j])\text{或}(A_1[j], A_1[i])\text{之间} \\ & \text{为无向连接关系时;} \\ 0 & \text{当}(A_1[i], A_1[j])\text{或}(A_1[j], A_1[i])\text{之间} \\ & \text{不存在连接关系时。} \end{cases}$$

4 结论

本文基于有向图建立了飞机数字化装配生产线全局模型,所建立的模型具有如下特点:(1)在复杂飞机产品零部件装配关系的表达上采用了分层装配信息表述方法,使得每次装配顺序规划只对少量零部件进行,避免了因零部件过多而造成的割集数量呈爆炸式增长,给以后的模型提取降低工作难度;(2)分层的原则采用设计分离面和工艺分离面信息,从而使得分层有向图模型体现了航空产品的结构特点和功能特点,使得模型具备更强的工程性;(3)在传统有向图的基础上增加了装配引入和退出关系的信息表示方法,可以将装配工艺经验映射为装配单元与装配过程信息引入和退出装配环境的优先关系;(4)优先关系、约束关系可以分别转换为有向图和无向图来表示,有利于计算机表达。

参考文献

- [1] Ranky P G. Digital, internet-enabled assembly line and factory modeling. *Assembly Automation*, 2004, 24(3):247-253.
- [2] Arieh D B, Kumar R R, Tiwari M K. Analysis of assembly operations' difficulty using enhanced expert high-level colored fuzzy Petri net model. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2004(20):385-403.
- [3] Zhu X W, Hu S J. Modeling of manufacturing complexity in mixed-model assembly lines. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2008, 130(5):1-9.
- [4] Yalcina A, Namball R K. An object-oriented simulation framework for real-time control of automated flexible manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, 2005(48):111-127.
- [5] Rangel I R. Building reduced petri net models of discrete manufacturing systems. *Mathematical and Computer Modeling*, 2005(41):923-937.
- [6] 刘平,李原,张开富.复杂产品装配的分层有向图建模方法. *机械设计*, 2007, 24(4):30-32.
- [7] 张开富,李原,邵毅,等.一种集成装配过程信息的装配建模方法. *西北工业大学学报*, 2005, 23(2):222-226.
- [8] 张杰,李原,张开富,等.基于关系对象 Petri 网的飞机装配系统模型快速构建方法. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(6):1195-1201.
- [9] 周炳海,王世进,陶丽华.基于扩展 Petri 网的混合系统建模方法. *东南大学学报*, 2005, 21(3):304-309.
- [10] 高峰,王明哲.装配生产线 Petri 网模型优化算法研究. *机械与电子*, 2004(5):13-15.
- [11] 吕超,李爱平,徐立云.基于权重有向图的可重构制造系统配置决策模型研究. *中国机械工程*, 2008, 19(15):1821-1826.

(责编 谷雨)

(上接第93页)

从而提高对超薄材料成形的操作技能和技术水平,使零件的加工质量得到可靠保证。

在培训和训练的过程中,可先针对高级技能以上操作人员进行,当以上变形缺陷的修正达到一定程度或符合要求后,再将培训和训练的范围扩大到全体操作人员。在此期间,还可以举行2~3次的同工种业务技能竞赛或技术比武活动,一方面可以增强和提高技术工人学习技术的积极性,另一方面还可以对培训和训练的学习情况进行检查。对钣金工程技术人员的培训,应重点放在成形模具的选用和设计技术条件的编制方面,以保证模具有良好的适用性和工件变形缺陷最小。

4 结论

在某系列无人机飞机超薄材料成形过程中,通过对钣金设备更新、热处理变形的控制、材料的预拉伸处理、建立转动中的搬运箱系统、技术工人进行的操作技能培训等措施,确保超薄材料飞机零件的成形,完成了型号研制任务,为该系列飞机的批量生产打下良好基础。

(责编 谷雨)