

大型铝合金机翼整体壁板加工 变形控制技术

Deformation Control Technology of Integral Panel for Large Aluminium Alloy Wing

中航工业陕西飞机工业(集团)有限公司工程技术部 林震宇 刘庆华 黄官平 王梅 郭绍华



林震宇

中航工业陕西飞机工业(集团)有限公司工程技术部高级工程师,现从事大型飞机数字化制造及加工变形控制技术研究。

航空航天工业数字化设计及制造技术的快速发展,对现代飞行器的性能要求不断提高,飞机设计结构发生了变化,开始大量采用整体结构设计,如整体框、梁、壁板等零件,零件的大型化和结构整体化趋势日趋明显,以铝合金材料为主导的大型整体结构件在航空航天等领域获得了广泛的应用。由于这类零件具有轻量

为了控制飞机重量,飞机零件的一个显著特点就是进行了薄壁化设计,但在零件的加工过程中,由于薄壁零件加工刚性差,切削过程中受到切削力、切削热的作用容易产生变形。同时由于零件内的残余应力对零件结构尺寸稳定性都有很大的影响,导致零件在加工过程中和结束后变形较大。所以,航空整体壁板在制造技术中所面对的最突出问题之一就是加工变形。

化、薄壁化和整体化的特点,采用数控加工方法已成为当前飞机产品中整体复杂结构件最主要的加工手段,是现代武器装备研制和生产中最主要的工艺方法。

为了控制飞机重量,飞机零件的一个显著特点就是进行了薄壁化设计,但在零件的加工过程中,由于薄壁零件加工刚性差,切削过程中受到切削力、切削热的作用容易产生变形。同时由于零件内的残余应力对零件结构尺寸稳定性都有很大的影响,导致零件在加工过程中和结束后变形较大。所以,航空整体壁板在制

造技术中所面对的最突出问题之一就是加工变形。

影响数控切削加工变形的 主要因素

飞机整体结构件数控加工变形产生的原因很多,与毛坯材料、零件结构形状、工艺方法、加工设备(图1)和操作人员经验等均有关。引起整体结构件加工变形的主要因素有以下几个方面:

(1)零件的材料特性和结构特点。

航空结构件的材料一般为高强

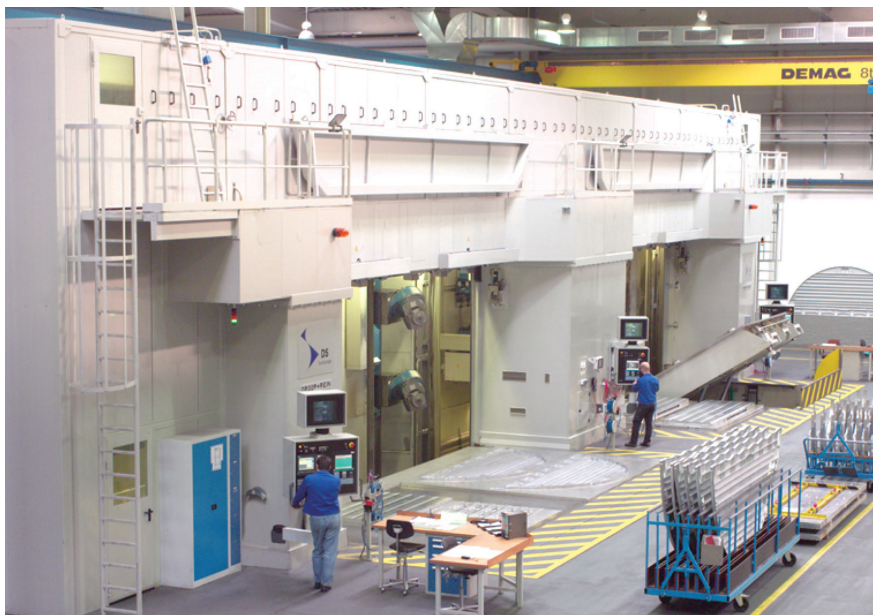


图1 高速翻版铣

度铝合金,其弹性模量为 70GPa 左右,约为钢的 1/3。由于弹性模量较小,屈强比大,在切削过程中极易产生回弹,特别是大型薄壁零件。另外,航空整体结构件形状复杂,几何结构不对称,薄壁部位多,自身刚度低,也是产生较大变形的内在因素。

(2) 加工过程中毛坯残余应力的释放与重新分布。

航空整体结构件(图 2)通常采用高强度铝合金厚板直接铣削加工而成。为获得理想的机械性能,铝合金预拉伸板必须经过轧制、固溶、拉伸、时效等一系列工艺流程,在这些过程中因存在不均匀的温度场和不均匀的弹塑性变形,板内产生了残余

应力。在加工过程中,随着材料的不断去除,板内残余应力发生释放与重新分布,原来的应力自平衡状态遭到破坏,零件只有通过变形才能达到新的平衡状态。毛坯残余应力的释放和重新分布是引起零件加工变形的重要原因。

(3) 切削过程中刀具与零件的热耦合作用。

刀具对零件的作用主要表现在切削力、切削热和加工表层留下的切削残余应力。一方面零件与刀具的接触部分发生

弹塑性变形,材料纤维层不断被切断;另一方面零件壁厚较薄,加工中产生回弹、让刀现象,加工精度不易保证。另外,被切削材料在刀具的作用下,产生大量切削热,造成零件各部位的温度不均,使其发生热变形(图 3)。

(4) 零件的装夹。

在装夹力的作用下和装夹方式的不合理使零件内部形成装夹应力而发生零件变形,对于刚性较差的薄壁结构件,装夹引起的加工变形不容忽视。

抑制铝合金板残余应力的技术现状

原材料制造中的残余应力有两种抑制方法,一是抑制淬火过程中残余应力的产生;二是用工艺方法消除或降低已产生的淬火残余应力。但采用优化淬火工艺参数来降低残余应力并不彻底。因此,本文在消除航空铝合金淬火残余应力工艺上投入了大量研究工作,主要有:

(1) 机械拉伸法。

它是将铝合金板淬火后在一定的时间内沿轧制方向进行拉伸,使拉



图2 大型整体结构件

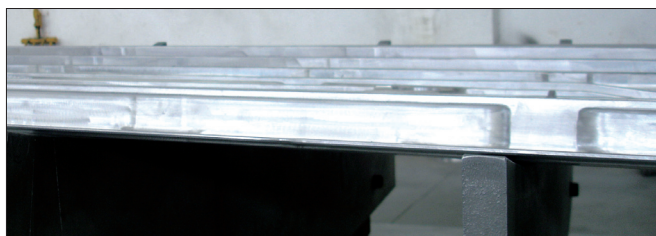


图3 铝合金整体壁板的加工

伸应力与板内残余应力相叠加后产生一定量的塑性变形,然后再进行时效,使残余应力得以缓和与释放。机械拉伸法可消除 90% 以上的淬火残余应力。

(2) 模冷压法。

它是在特制的精整模具中,通过严格控制的限量冷整形来消除复杂形状铝合金模锻件的残余应力。

(3) 深冷处理法。

它将固溶处理后的铝板或毛坯浸入液氮中深冷,待内外温度均匀后又迅速地用热蒸汽喷射,通过急冷与

热时效法是目前还在广泛采用的传统机械加工时效方法,通过将金属结构件加热到一定温度,保温后控制降温,达到消除残余应力的目的,可以保证加工精度和防止裂纹产生。

(2) 自然时效法。

自然时效法是将零件长时间放置在自然环境,利用环境温度的季节性变化和时间效应使残余应力释放,由于周期太长和占地面积大,仅适应长期单一品种的批量生产,效果不理想。

(3) 振动时效法。

整体壁板加工的主要难题之一。

1 残余应力下加工整体壁板变形数值模拟

(1) 有限元模型建立。以开槽法内应力释放为研究对象,应用有限元分析方法,建立整体壁板开槽法残余应力释放的力学模型,选用尺寸为 11000mm × 600mm × 85mm 的零件毛坯开展分析,单元划分类型采用 8 节点六面体单元,为了控制单元数量,多划分成细长的长方体形状。有限元模型沿板厚度方向等分成 10 层,每层 4.25mm,共有 5000 多个单元。

(2) 有限元仿真的开槽方案设计。开槽法常用来释放内应力,减小航空整体结构件的加工变形。根据零件具体结构形式,对开槽方法进行了建模、分析和比较,在不增加其他工序,不降低加工效率,简单易行,可操作性强的原则下找出影响开槽效果的要素和较佳的开槽方法。

所设定的开槽方案如下:

- 开槽深度分析;
- 中间不同开槽数量方案对比;
- 边上横向与纵向开槽方案对比;
- 中间纵向和横向开槽方案对比;
- 边上不同开槽数量方案对比;
- 边上与中间纵向开槽方案对比;
- 组合开槽: 边上纵向槽 + 中间纵向槽。

(3) 开槽后毛坯残余应力分析结论。

· 开槽深度的影响为开槽深度增加,毛坯件的变形先是迅速增加,继而缓慢减少,以沿厚度方向开通为佳。

· 边槽与中间槽比较中边槽效果好。同时开中间槽和边槽,变形上没有明显变化,但是应力释放范围有所改善。

· 横向与纵向槽比较中纵向槽的变形小于横向开槽的变形。

· 开槽数量的影响中开槽过多则变形更大,从数值模拟结果看,中间纵向开四个槽结构的变形最小,边沿

表1 各种时效方法对比

项目	自然时效	热时效	振动时效
应力消除率	10% 左右	30%~80%	30%~60%
抗变形能力	较好	比时效前降低	比热时效提高 30%~50%
尺寸稳定性	好	较差	较好
适应性	几乎任何零件	受零件尺寸、材料限制	几乎任何零件
工序安排	须在精加工前	安排在精加工前	可安排在任何工序
时效时间	时间较长	20~60h	1h 以内
时效成本	占工作场地	150~300 元/t	10 元/t
投资回报		5~8 年	半年
环境保护	无污染	对环境有污染	无污染

急热产生方向相反的热应力来抵消原来的固溶处理时产生的残余应力。深冷处理法可降低 20%~84% 的残余应力。

(4) 振动消除法。

它是用一个或多个强力激振器,使工件产生一个或多个振动状态,从而产生如同机械加载时的弹性变形,使零件内部某些部位的残余应力与振动载荷叠加后超过材料的屈服极限而引起局部塑性变形,导致内应力的降低和重新分布。当铝合金在淬火后的不稳定状态(0~2h)进行振动,残余应力可降低 50%~70%,若在淬火后 360h 进行振动消除,残余应力只能消除 10%~20%。

在机械加工残余应力的消除工艺上采用的时效方法包括(表 1):

(1) 热时效法。

振动时效法是一种可完全取代热时效和自然时效的工艺,其通过振动消除残余应力,可达到热时效工艺同样效果,并在许多性能指标上超过热时效。振动时效对降低或均化金属结构件的残余应力,提高抗动载变形能力,稳定尺寸精度有非常好的效果。但振动时效也有一些局限性,对于箱、板形零件,时效噪声较大;不适宜于高压容器、大尺寸的薄板焊件、弹性结构应力为主的零件、刚性过大件,以及冷拉、冷拔、冷轧钢。

大型铝合金整体壁板变形控制技术应用

随着航空零件设计向整体化、复杂化方向发展,航空铝合金整体壁板加工变形是加工中最难确定的因素,加工变形控制成为困扰大型铝合金

开 4 个通槽的变形最有利。

综上所述,切削加工中超前释放槽的数量和位置是控制毛坯变形和残余应力释放的关键因素。基于分析结果,边沿开 4 个纵向的释放槽与中间开设四个纵向的超前释放槽的组合方案最佳(见图 4 和 5)。



图4 典型零件结构

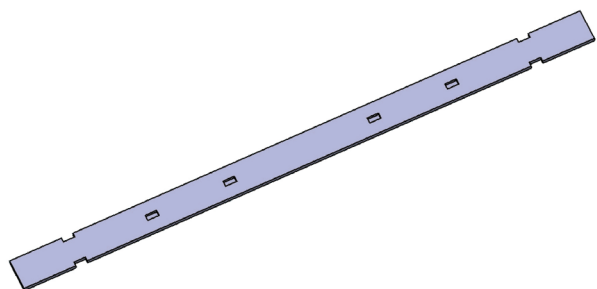


图5 组合开槽形式

2 加工残余应力释放的振动时效技术

振动时效是以共振的形式给零件施加附加动应力,当附加动应力与残余应力叠加后,达到或超过材料的屈服极限时,零件发生微观或宏观塑性变形,从而降低和均化零件内部的残余应力,并使其尺寸精度达到稳定。由于整体结构件几何形状变化多,使应力集中点很多。因此,为了有效降低残余应力的影响,可采用以下措施:

(1)根据需要对毛坯件采用振动时效技术,振动消除应力 30~50min,以期消除 20% 以上的残余应力。

(2)在加工中采用分步加工,每步作振动时效处理,降低残余应力集中,使应力分布均匀。建议沿厚度方

向分步去除材料后,增加振动时效处理,以保证尺寸的稳定。

振动时效对于企业提高产品质量、降低生产成本和提高生产效率具有良好的前景。

3 加工变形控制方法

(1)加工变形控制工艺流程。

大型整体壁板类零件其毛坯采用预拉伸铝合金厚板,整体壁板结构上为一面理论外形面、一面带工字形长桁和对接凸缘的非对称类零件,材料去除率高达 92% 以上。在加工过程中由于受残余应力的影响极易产生加工变形,如果不能很好地处理残余应力问题,零件在加工过程中及加工后容易发生变形,从而导致零件尺寸超差或者无法满足装配要求而报废。为了有效控制大型整体壁板零件的加工变形,特制定了以下工艺流程:铣出应力释放槽、加工定位基准、粗加工、自然时效、半精加工和精加工等。

(2)层优先加工。粗加工采用层优先的加工策略编程方式,使零件沿 Z 向均匀去除材料,避免因应力集中而产生的变形。

(3)精加工过程非常重要。由于壁板类零件长径比很大,加工过程中容易造成零件侧弯,而精加工将形成零件的最终尺寸,因此在精加工过程中要进行科学的工艺设置,对加工的顺序要进行合理调整安排,采用局部往复、区域间对称加工的顺序方式。另外,采用沿零件长度方向均匀钻制工艺孔和多个插销定位的方式,用于监控和防止零件侧弯。

(4)选用大直径刀具及高速切削。由于粗加工使用大直径刀具并采用了高速切削加工技术,可以快速将切削热通过铝屑带走,最大限度的防止整体壁板切削加工时的热变形。故此在高速机床上目前较为普遍使用的是 HSK 系列短锥刀柄。该锥柄采用锥面和端面双重定位,刚性好、精度高。刀柄为中空、短锥体,轻量化(重量减少 50%)。这样提高了定位精度(重复定位精度也高),消除 Z 向定位误差,减少了转动惯量。使之刚性好(良好的静态和动态刚度)、精度高,可满足高速高精度加工要求。其原理见图 6。

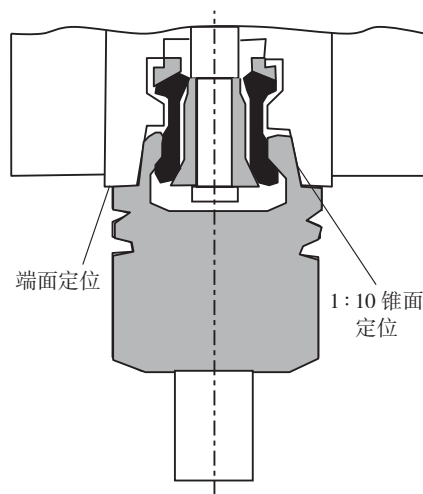


图6 HSK系列短锥刀柄

结束语

通过研究大型壁板类零件加工变形的控制技术,解决航空结构件在加工过程中由于残余应力引起的零件加工变形。工厂广泛采用开槽预释放变形和振动时效工艺控制毛坯的加工变形,但其参数确定主要依靠经验暂无相关理论依据,因此其参数有待进一步研究和优化。通过积极开展有限元模拟、变形控制工艺方法和振动时效技术研究,找出较合理的应力释放开槽方法和变形控制工艺,解决航空铝合金大型整体壁板零件的加工变形,提高零件加工尺寸的可靠性和产品质量。(责编 三丰)