

Machining Deformation of Aircraft Structure and Its Control

南京航空航天大学机电学院 何宁 杨吟飞 李亮 赵威



何宁

南京航空航天大学教授、博士生导师,现任南京航空航天大学国际教育学院院长,兼任中国机械工业金属切削刀具技术协会常务理事、中国刀协切削先进技术研究会副理事长、中国航空航天大学协会刀具委员会委员、机械工业高速精密工具工程技术研究中心技术委员会主任,“十一五”国家科技支撑计划“高速高效切削工具的研究开发”重点项目专家组成员。

航空结构件的加工变形受到毛坯状态、切削参数、装夹方案、零件和机床状态的影响,其规律难以掌握,但是作为飞机的关键部件,其变形量必须得到良好的控制。

我国航空工业经过 50 多年的发展,已经形成较完整的体系,具有自主研发能力,飞机种类齐全,并实现系列化生产,相关配套产品也比较齐全。目前,中国拥有自主知识产权的支线飞机 ARJ21 首飞告捷,并获得了 170 架的初期定单。支线飞机“新舟 60”获得了良好的市场反映,已进入国际市场。“枭龙”已经出口到巴基斯坦,“歼-10”三代战斗机性能超过美国的三代战斗机“F-16B”,标志着我国飞机工业已进入国际先进行列。

近年来,在航空发动机设计制造上取得较大突破,研制生产出了昆仑、太行、秦岭、天山等燃气涡轮发动

机,进一步促进了我国航空技术的全面发展。我国政府高度重视航空工业,将大飞机发展战略列入未来 15 年的发展专项中。随着大型飞机的研制项目立项,我国的航空工业将进入新的快速发展阶段。

为满足市场需求,大型客机必须具有机身结构的高可靠性、低燃油消耗率和乘坐舒适性,大型运输机则要求高的载重量。飞机零件的设计理念已经随着这些需求发生了变化,零件设计向着薄壁化、整体化和复杂化方向发展,并要求提高飞机的整体结构强度,简化装配环节,降低飞机自重。另一方面,薄壁整体复杂零件对机械加工技术提出了新挑战。结构

复杂的飞机薄壁板、薄壁肋、整体梁、整体框、整体缘条等各类航空结构件如何高效率、高质量、低成本地完成机械加工是我国航空制造业亟待解决的难题之一。其中,有效控制航空薄壁整体复杂零件的加工变形是保证航空产品质量的关键技术。

航空结构件与加工变形

1 航空结构件及其特点

随着对航空产品性能要求的进一步提高,现代航空设计中广泛使用整体薄壁结构件,典型的有壁板、肋、梁、框、缘条、长桁以及座舱盖骨架等,其结构特征为薄壁、截面尺寸小,外形尺寸大、结构复杂、非对称与变截面等。材料主要为弹性模量较小的铝合金和钛合金,材料状态通常为锻件、轧制板或预拉伸件,一般采用数控铣削进行加工。典型的薄壁结构主要由薄壁和薄腹板构成,局部刚性差;而典型的整体件的主要特点是零件的外形尺寸及其截面尺寸是多种多样的,大多采用结构形状复杂、非对称或变截面。某些结构件则同时具有薄壁和整体的特征。

各类航空结构件毛坯在其铸造工艺中产生了宏观内应力,并且在后期的锻造或轧制、热处理等环节中不断发展形成复杂的分布状态。毛坯需进行各种预处理(如时效处理或预拉伸处理)工艺以降低和均化其宏观内应力,但是预处理工艺并不能完全消除内应力,而且一些毛坯是锻件或者铸件,其内应力值大且分布复杂,毛坯中复杂的应力分布和航空结构件加工过程中的高材料去除率、非对称去除等特点都造成航空结构件在加工过程中出现加工变形控制难的问题。航空结构件的加工变形受到毛坯状态、切削参数、装夹方案、零件和机床状态的影响,其规律难以掌握,但是作为飞机的关键部件,其变形量必须得到良好的控制。

2 航空结构件加工变形

航空结构件的加工变形由多种因素引起,并具有多种形式。根据零件变形的时间、尺度、原因以及影响不同,可以将航空结构件加工变形分为两大类:结构局部变形和外形轮廓整体变形。结构局部变形主要出现在切削加工过程中,通常表现为让刀、过切,局部弯曲等,其尺度局限在刀具与工件的接触区域附近。薄壁特征的零件由于薄壁或者薄腹板的局部刚性不足,切削过程中的切削力和切削热以及机床-刀具的刚性不足,会引起零件局部变形。局部变形将导致零件局部尺寸超差和形貌超差。整体轮廓变形主要表现为切削加工完成后(如卸除夹具工装后)的整体弯曲、扭曲以及零件放置过程中的伸长和缩短等,其尺度与结构件外形轮廓尺寸相当。大尺寸整体结构件加工后往往表现为外形轮廓的整体变形,主要由材料大量去除后内应力再平衡分布引起,温度变化导致的热胀冷缩和放置过程中的自然时效也是引起整体轮廓变形的重要因素。工件的热胀冷缩,在一定的温度范围内是一个可逆过程,可以通过控制加工车间温度、运输温度以及装配车间温度的一致性来解决。

薄壁结构零件的铣削加工

1 消除薄壁零件局部变形的思路

薄壁零件的壁厚通常为0.5~3mm,其局部刚性较弱,在加工过程中受切削力和切削热影响较大。控制薄壁零件加工变形的主要问题在于处理好切削力和零件局部刚度的关系。降低切削力和利用零件剩余刚度是消除薄壁零件局部加工变形的主要途径。

薄壁加工理论研究和实际应用表明,高速切削在改善局部变形方面具有两大优势:

(1) 高速切削具有较小的切削力,在加工薄壁零件时工件产生的让刀变形相应减小,易于保证零件的尺

寸精度和形位精度。

(2) 高速切削时,由于切削热绝大部分由切屑带走,工件温升不高,工件加工热变形很小,这对于减小薄壁件的热变形也非常有利。

应用高速切削控制薄壁零件局部变形的基本原则是协调切削力和零件剩余刚度这对矛盾,在切削过程中优化加工参数,控制适当的切削力,始终保持零件具有最大的剩余刚度来抗衡切削力,可以达到控制零件加工变形量的目的。

现代加工要求加工工艺具有可预测性。航空薄壁零件加工质量控制需要建立动、静态铣削力模型,对薄壁件的加工变形进行分析,在预测其变形量的基础上设计薄壁件的铣削加工变形控制工艺。

2 薄壁零件铣削加工变形分析

薄壁零件的结构复杂,厚度小,加工余量大,相对刚度较低,加工工艺性差,切削过程中切削力将使零件产生局部加工变形和让刀现象,其结果包括2个方面:铝合金或钛合金的弹性模量较低,在切削力较大的情况下将使壁板根部发生不可恢复的塑性变形;让刀后的弹性回弹产生壁板厚度增加的尺寸误差。由此可见,切削力是导致薄壁零件局部加工变形超差的主要因素。由于高速切削时,切削热主要被切屑带走,同时铝合金具有优良的导热性能,切削热对薄壁件局部加工变形的影响可以忽略不计。薄壁零件铣削加工变形分析应首先详细分析切削力对加工变形的影响。在挤压作用下,刀具、切削层金属和已加工表面都会产生弹性变形和塑性变形,因此有法向力分别作用于前、后刀面。由于切屑和工件相对于刀具运动,因此前、后刀面上都会产生摩擦力。综上所述,切削力作用下的弹塑性变形会产生抗力和摩擦阻力,可以建立铣削加工的力学模型。

3 薄壁零件局部变形控制工艺

在采用高速切削技术降低切削力的基础上,采取优化零件剩余刚度和让刀误差补偿的措施可进一步控制薄壁零件的局部加工变形。

为了消除由于工件和刀具受力变形带来的加工精度误差,可采用刀具偏摆过切补偿工艺切除残留材料。在铣削加工时,可以通过事先的工艺试验和薄壁切削受力分析预测薄壁结构在铣削过程中的变形量。根据预测变形量将刀具进行偏摆,并将该过程进行有限元迭代分析,最终获得最优刀具偏摆量。将该刀具偏摆量纳入数控编程,使得刀具在实际切削中偏向工件偏离方向,从而克服让刀带来的壁厚变厚的现象,实现加工误差的补偿。

根据文献报道,利用上述工艺可以加工出铝合金的薄壁结构,在壁厚10mm的情况下,壁厚可以仅为0.5mm。

整体结构件铣削加工

1 整体结构件加工变形分析

整体结构件在加工过程中材料去除率高,截面形状复杂,毛坯中的宏观内应力随着材料的去除被逐步释放。由于工装夹具的限制,工件在卸夹具前并无明显的整体轮廓变形,因此在加工过程中,应力重新平衡受到装夹的限制,工件具有强烈的变形趋势,工件形状处于不稳定状态。在加工完成后装夹被卸除,工件变形的同时应力达到新的平衡,工件形状趋于稳定。虽然加工后的零件仍然会自然时效,应力场还将慢慢转化为更低能量的分布状态,工件形状还将随之变化,但是该变形远小于工装释放瞬间的变形。因此可以说,毛坯件的内应力释放及再平衡是导致航空结构件整体变形的主要因素。仿真研究和实际生产均表明不同内应力分布的毛坯将产生不同的零件变形,且变形量与材料切除引起的力矩不平衡量直接相关。

各种时效方法特点

比较项目	自然时效	热时效	振动时效
应力消除率	10%左右	30%~80%	30%~60%
尺寸稳定性	好	较差	较好
抗变形能力	较好	降低	提高30%~50%
疲劳极限	不变	降低	提高5%
疲劳裂纹扩展门槛值	不变	提高20%	提高20%
时效变形量	可忽略不计	较大	可忽略不计
组织硬度	不变	下降10%	不变
有无氧化皮	有	有	无
适应性	任何工件	受工件尺寸和材质限制	几乎任何工件
工序安排	精加工前	精加工前	任何工序中
时效时间	半年以上	20~60h	1h以内
时效成本	占场地资金	150~300元/t	10元/t
环境保护	无污染	污染较严重	无污染

2 现有轮廓整体变形控制方法

克服内应力引起的加工变形,在实际生产中为控制整体变形主要采用以下几种方法。

首先,应选用应力分布均匀的毛坯。整体变形由内应力引起,选择应力分布均匀的毛坯将有利于应力测量,掌握其内应力分布规律,并通过仿真等手段优化工艺路线。航空结构件的毛坯有锻造、轧制和预拉伸等许多种,其中预拉伸板内应力呈M型分布,具有较强的规律性,并且应力幅值较低,便于在生产过程中摸索变形规律,是理想的整体结构件毛坯。

其次,对各种毛坯进行内应力预释放,方法包括各种时效处理和设置应力释放缺口或释放槽。将毛坯进行时效处理是最直接的应力消除方法,但是不同时效方法的效果、适用性和经济性并不相同,见上表。相比较而言,振动时效既具有自然时效的尺寸稳定性,又能像热处理时效一样降低应力峰值,均化应力分布,并能在一定程度上提高材料性能,同时具

有适应性强和无污染的特点,作为一种投资少、见效快的时效方法,受到了航空制造企业的青睐。

应力释放缺口技术是航空制造企业经过大量试验验证的有效控制变形的有效方法。经验表明,应力释放缺口应开在加工过程中应力集中的部位。例如,缘条等容易弯曲的零件,其容易产生应力集中的部位是腹板边缘;梁间肋容易翘曲,应力集中部位为缘板和立筋的顶部。该方法简单可行,具有很强的操作性,但是在理论上应进一步深入研究,掌握其释放内应力控制变形量的机理。

最后,当各种工艺措施仍均无法保证较小整体变形量时,可对变形零件采用变形校正工艺。孙杰等人通过仿真和试验手段系统地研究了航空结构件安全校正理论,提出了复杂变形的校正方法,通过机械方法对已变形零件进行校正。结构件因校正引起的应力分布会影响零件的服役疲劳寿命,应当予以关注。

3 轮廓整体变形控制存在的问题及对策

尽管在实际生产中已经采用各种方法控制轮廓整体变形,但是由于变形导致的零件形貌超差现象依然存在。

国外预拉伸板的内应力分布基本符合M型规律,应力水平低,并且具有良好的一致性。国内预拉伸板质量上与国外同类产品存在一定差距,内应力分布规律性差,直接导致单件试件的测量结果存在较大误差,变形规律难被掌握。

此外,对于锻件和铸件毛坯的加工变形还缺少有效的分析与控制方法。最关键的问题在于其内应力复杂多变,每个零件的内应力分布不具有规律性,并且难以准确测量。在内应力分布未知的情况下,无法实现加工变形分析,从而整体变形控制就不具有可预测性和可控性。设置应力释放缺口的应力释放方法由于缺乏理论指导,带有一定的盲目性。

基于内应力再分布导致零件整体变形这一事实,作者所在课题组提出了应力场反演技术估计材料内部残余应力场,并提出了基于内应力再

分布的加工变形控制新思路。

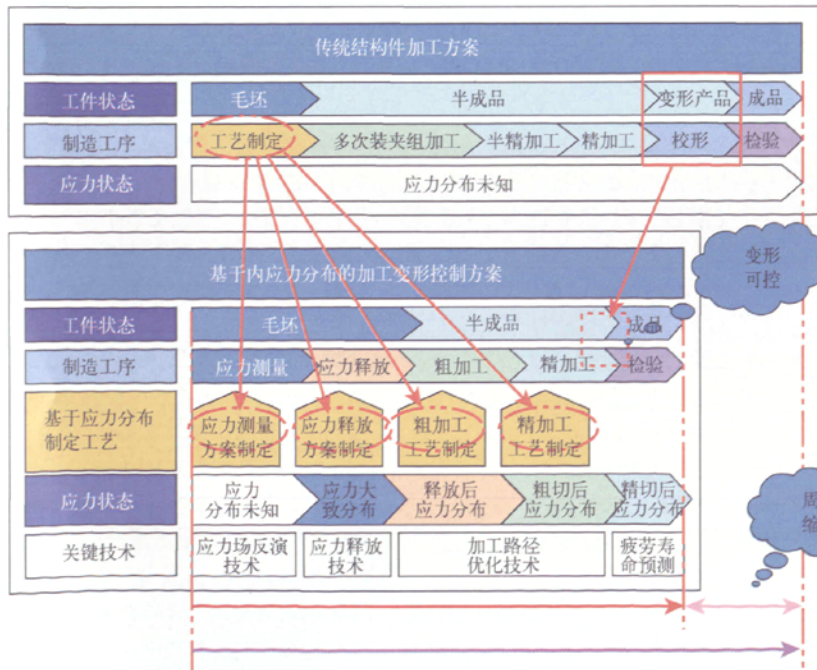
如下图所示,在传统加工方案中,工艺在粗加工前被完全确定。考虑到内应力的释放导致变形,需设置多道粗加工和夹具释放过程,目的在于将整体变形消化于粗加工和精加工流程。由于未考虑内应力的初始分布及其在加工过程中的变化情况,采用该方案生产出的结构件往往存在一定程度的变形,因此变形校正工艺也是必需的。新的基于内应力分布的工艺思路有别于传统结构件加工方案,新方案充分考虑毛坯的初始应力状态及其在加工过程中的变化情况,在粗加工前设置应力测量工艺确定初始内应力分布,并在此分布基础上设置优化的内应力释放工艺。释放后的内应力分布将作为制定粗精加工工艺的参考。整个工艺过程中,内应力的变化由应力检测系统监测,据此制定的工艺路径是被优化的,可以将变形控制在公差范围内。该方案具有3个优点:首先,无需变形校正工艺即可获得合格产品;其次,减少了粗加工次数,提高了生产效率;最

后,零件的最终应力状态可知,能够为零件的疲劳寿命估计提供数据。

该方案的关键技术包括应力场反演技术、应力预释放技术、装夹和加工路径优化技术以及加工完成后的基于应力的疲劳寿命预测技术等。其中应力场反演技术可以由少量的应力测量结合插值等数学方法实现。国内学者已注意研究航空结构件的装夹技术,并已经开发出了基于人工智能的有利于变形控制的装夹优化技术。现有加工路径的优化技术包括分层优先对称加工策略和准对称加工方法等。这些方法的基本思路都是通过内应力的对称释放来降低工件的变形量。对于非对称应力分布或非对称结构的加工路径优化方法还有待进一步研究。

结束语

根据现代航空工业的需求,航空结构件朝着薄壁化、整体化、复杂化方向演变,解决其加工变形问题对于提高航空产品质量和加工效率具有重要意义。本文在分析了典型薄壁件和整体件加工变形特征的基础上,详细分析了现有变形控制方法。针对局部变形和整体轮廓变形两种不同的加工变形类型,提出了不同的处理方法。对于薄壁加工切削力导致零件局部变形的问題,提出了基于高速切削技术的剩余刚度和刀具偏摆补偿技术,指出结构件轮廓整体变形主要由内应力释放再平衡引起,并提出了基于内应力分布的加工变形控制方案,该方案的若干关键技术还必须进行深入研究,以提高航空航天复杂结构件加工质量和加工效率。(责编 傅敏)



基于内应力分布的加工变形控制方案