

# 铝合金薄壁件加工变形的力学模型构建与研究分析

刘东东

中南大学材料科学与工程学院 湖南 长沙 410012

**摘要:** 针对铝合金薄壁零件的粗精加工特点, 构建了薄壁零件铣削全过程的3D有限元模型, 并对其动态加载、切削力建模和切削过程中的动态加载、材料去除等关键技术进行了深入研究。利用自主搭建的成形工艺仿真平台, 实现了具有不同初始残余应力分布的薄壁零件的成形工艺仿真。数值模拟发现, 加工残余应力是影响薄壁零件加工与变形的关键因素, 过大的残余应力会使薄壁零件侧壁首末自由端附近产生加工变形波动, 容易引起或加剧切削振动, 严重影响其加工精度及表面质量。

**关键词:** 铝合金薄壁; 加工特点; 有限元模型; 切削振动

引言: 通过研究我们发现, 零件的加工变形与零件类型、材料类型以及制造工艺密切相关。关于变形的预测, 国内外已经做了很多工作, 主要是考虑了在材料的初始状态以及零件的形状是在原始板料的位置上, 对零件的最终变形进行预测。在此基础上, 结合试验与有限元仿真, 构建复杂零件成形过程中的力学耦合作用机理。针对当前薄壁零件成形过程中, 成形过程中零件变形的预测大多采用非线性有限元模拟, 模拟结果与试验结果有较大偏差的问题, 本项目拟通过分析成形过程中产生的变形量, 建立成形过程中的应力分布和变形之间的数学联系, 从而为零件的成形和成形提供理论依据。通过对薄壁件在切削应力作用下的变形机理的理论分析和建模方法的建立, 建立了薄壁件在切削应力作用下的应力-变形数学模型。

## 1 铝合金材料加工变形的主要影响因素与特点

### 1.1 影响因素

在分析了影响铝合金零件成形的主要因素后, 指出了影响铝合金零件成形的主要因素是机床、刀具和夹具, 以及通风条件和温度等。在这些因素中, 钢度的高低将直接影响到机床的定位精度。在工件装夹时, 若夹持点不正确, 将对夹持力产生影响; 如果夹具与工件的接触面积比较小, 也会影响其度, 若其自身的钢度达不到要求, 在实施装夹力时就会引起变形。此外, 刀具对铝合金加工变形的影响, 主要体现在材料、钢性和耐用性上。而在这些因素中, 切割工艺的影响最大。当进行高速切削时, 切削热量将大量地被排出。在工件热变形进一步减小的情况下, 在切削参数不合理的情况下, 很可能造成加工零件的振动, 从而导致加工精度的下降和加工变形的产生。在铝合金材料的加工变形因素分析中, 主要包括: 第一, 温度和挤压速度不够合理。在比

较长期的情况下, 铝合金材料的处理都是选用传统的处理方式, 这将影响到对处理温度的实际控制; 第二, 在处理时, 对物料放置的位置没有进行适当的选取。如果没有足够的气流, 则会使零件的冷却速率减慢, 从而影响到气体的流通, 从而造成板料的挤压变形。第三是模具设计上的瑕疵。在挤压的过程中, 由于各种因素的影响, 会造成加工之中的颤抖, 进而造成表面波纹。

### 1.2 特点

将铝合金材料用于零件的加工, 而挤出加工的材料可以是管子、生产棒等。利用简单的铝型材, 制造出较复杂的型材、管。这种复杂的型材和钢管, 在各行各业都有广泛的应用, 而且效果也很好。

## 2 铝合金薄壁件加工工艺分析

切削速度对塑性变形和表面粗糙度有很大的影响, 在低速切削时, 塑性变形比较小, 表面粗糙度会降低, 而在高速切削时, 塑性变形的速度不像切削速度那么快, 因此更容易得到好的粗糙度。由于刀片的几何尺寸不同, 刀片的切削力也会有不同的影响。进给速度和后吃刀速度的不同, 将引起切削力的不同, 进而影响到塑性形变层的厚度和塑性形变层的深度。选择工艺参数和不同的加工方式, 会对侧铣薄壁零件的切削力产生较大的影响, 其中最重要的是轴向切深, 其次是进给量, 最后是径向切深以及切削速度。圆弧切割和斜切切割对切削力的影响也不可忽略。加工过程中, 在夹持力、切削力、重力、惯性力等因素的影响下, 加工系统会发生变形, 而在加工过程中, 加工力的受力点位置不断变化, 毛坯的加工余量变化, 材料的硬度变化, 都会导致加工系统的变形。在加工过程中, 由于加工过程中加工体系的变形以及变形量的改变, 将导致加工过程中零件的几何、尺寸等误差。然而, 只要合理地选择切削量和刀具

的几何参数,就可以将切削力以及因切削力变化而产生的变形降到最低,为了尽可能地降低由误差复映规律而产生的变形,应该对加工余量进行合理的分配,分几次进行走到加工,将这种形式的变形降到最低。

### 3 模型构建

#### 3.1 薄壁件应力分布

以等厚度薄壁杆件为例,对其纵向纯弯曲变形进行了分析,并给出了计算公式。如果加工后的部件上的应力都是以压力应力的形式,那么它在纵向(Y方向)上的应力就是在薄壁和底部。薄壁杆件的壁面和底面会产生一种厚度不大、强度不高的加工表面应力,并与厚板初生应力一起构成了这类结构的纵向应力分布形式。其中,表层应力和初应力区的分布有较大差别,表层应力强度较高,但分布较浅,而初应力区则较弱,为结构化应力分布。

#### 3.2 力学模型数学解析

利用对称加工的特性,可以将薄壁框架件在Y轴上沿着Z方向弯曲变形的挠度值作为计算对象。通常,在X正交方向上分布的肋板,其厚度相对于构件的长度尺寸非常小,其对长度的影响可以忽略。当将薄壁构件简化为梁构件时,由于内部应力在Y向上引起的弯曲变形将由内部应力引起。

### 4 实验与分析

由于在加工过程中,板坯的几何尺寸、初始应力分布发生了变化,同时还受到了附加的外场工艺应力的影响,因此,在加工过程中,框架内部的应力分布差别十分复杂,用直接的函数分析方法很难得到零件的变形。在此基础上,本项目拟采用试验研究的方式,在确定此类结构物的应力、变形分布情况的基础上,建立适用于此类结构物的分析模型,保证模型的精度。

#### 4.1 实验设计

采用磨削、喷砂等试验手段,改变零件的应力场,获取零件的变形量,并对所建立的数学模型进行检验。铝合金厚板进行了固溶处理和预拉伸处理,板坯尺寸为500mm×108mm×60mm,弹性模量为71GPa,厚板铣削时采用真空吸附夹具夹紧,以减小装夹力对构件造成的变形影响,加工后构件尺寸,试样薄壁厚为2mm,底部厚度6mm,侧壁厚度为2mm,肋板厚度为21mm。之后,对试样薄壁和底部先后进行了表面全覆盖的喷砂处理,以零件喷丸强化标准为参考,在喷砂时,以石英砂为喷料,喷料规格为0.5mm,喷射压力为0.3MPa,喷射距离为80mm,垂直构件表面喷射。在此基础上,通过喷砂来改变零件的受力状态,从而使零件产生变形,从而得到

了经过磨削和喷砂后的变形样品。利用三标记测量器,对铣削前后和喷砂前后的部件沿长度方向(Y方向)的挠曲曲线进行扫描,获取。在步长为10mm的情况下,以1 $\mu$ m/m的精度进行扫描。在此基础上,提出了一种分层轧制工艺,利用轧制过程中的应力卸载,实现了组织中残余应力的反演,该工艺对于规整厚板类毛坯具有很好的应用前景。而表面应力是通过化学逐层腐蚀后,采用PROT0-X射线衍射表面应力测试仪测量获得的,其方法是:在铣削加工和喷砂后的试样表面,先用5%的NaOH溶液逐层腐蚀到不同深度,再用XRD测量表面应力,以获得表面逐层深度上的应力分布。

#### 4.2 初始应力测试实验

实验使用的材料是7075铝合金厚板,经过T651处理,板坯尺寸500mm×230mm×60mm。首先,获得铣削前厚板初始应力,由X射线衍射法测得其表面应力强度,为初始应力标定块的尺寸以及测试点位置。在校准块体中部,测量了X向应力的平均值,为-10MPa。采用层削法,沿着厚度方向,按照一定的增量厚度,采用铣削加工,剥除带有应力的厚度层,从而使试样基体应力平衡状态发生变化,而产生变形。根据测得的变形,逆求计算出剥离层应力值,获得构件初始应力分布函数,为退火板层削法实验应力应变图,可以看出,铝合金厚板沿厚度方向残余应力分布,应力值在 $\pm$ 5MPa之间。

#### 4.3 微m厚度的PVD涂层

微m级的PVD镀膜是影响机械加工性能的重要因素。在此基础上,以C基底为基底,结合优化的构型,进行涂层的优选与应用。初步优化获得了AlCrXN、TiAlCrN、TiAlN三种涂层。选择同样的基材切割参数作试验,加工300分钟后,刀具的磨损状况良好。从磨损量和磨损量上可以看出,AlCrXN镀层具有最佳的切削性,是我们选用的最佳的镀层。

### 5 铝合金加工变形控制措施

在进行铝合金加工变形控制的过程中,需要考虑到各种有效措施的使用,如加工技术、冷处理、热处理等等,选择对应的加工技术,就可以满足其变形的有效控制。

#### 5.1 选择先进的加工技术

在对铝合金加工变形进行控制的过程中,要考虑到采用各种有效措施,比如加工技术、冷处理、热处理等等,通过选择与之相适应的加工技术,就能够实现对其变形的有效控制。

#### 5.2 利用冷处理技术

在对铝合金材料进行加工的时候,因为切割过程中的温度比较高,所以要对切割的力度进行控制,对先进

的铝合金材料零件的加工工艺进行合理的运用,并将加工工艺的正确运用好,这样不但能够达到对铝合金材料在加工过程中变形的控制,而且还可以高质量、顺利地完成对铝合金零件的加工生产。

### 5.3 利用热处理技术

同时,也可考虑采用冷处理工艺,避免出现加工偏差。在进行冷加工时,可使用振动所生成的能量,使部件发生运动。但在这个过程中,震动的强弱也是有区别的,震动的强弱,会让散乱的零件重新归位,增加零件的稳定性,防止零件的变形。

### 5.4 装夹方式

在铝合金材料的加工过程中,仍然存在着一些应力值,而这些应力值的大小,将会对已加工工件的自身质量产生直接的影响。要保证工件的质量,防止材料的变形,就必须采用适当的方法,来直接消除所产生的应力。而在消除应力方面,热处理是当前最常用的方式,当采用这种方式时,要根据具体的情况进行合理的选择和优化。

### 5.5 合理利用切削刀具

根据所制造的产品具体特征,对相应的装夹方法的选取也要进行考虑。在零件的尺寸比较大的时候,可以采用真空的装夹方式,而在零件的尺寸比较小的时候,可以采用虎钳装夹的方式。这种方法在保证稳定性和刚度的同时,还可以对加工的质量和效率进行进一步的提高,从而避免了铝合金材料的变形,还可以降低加工成本和实际的劳动强度。

## 6 结果与分析

### 6.1 有限元模型建立

铝合金是一种通过热处理和预拉伸工艺而生产出来的铝合金,它拥有良好的加工性能、高韧性和加工后不容易变形等优点,经常被用来制造飞机蒙皮、壁板等。采用ANSYS Workbench软件,对薄壁件进行模态模拟,并基于模态实验中的真实装夹状态,构建有限元模拟模型,将不同阶次的自振频率、模态振型等因素纳入有限元模拟结果。在模态分析中,每一阶振型所含的权系数都是其自振频率的倒数,也就是随着其自振频率的降低,权系数也随之增大。由于低阶振型与外部环境之间存在着复杂的耦合关系,其对结构动力特性的影响远大于高阶振型。

### 6.2 实验结果

构件的初始态、铣削加工、薄壁喷砂和底部喷砂4种状态下,长度方向(Y方向)挠曲线分布,对横坐标长度进行了归一化,构件的实际长度为500mm。最大变形点位于杆件的中部,与理论分析的结果相吻合。与原始情况相比,铣削过程中的杆件发生了明显的弯曲,其中心部位最大变形量增加了68m。之后,由于在薄壁上使用了喷砂处理,使得构件产生了进一步的拱曲变形,中间位置的最大挠度增加了128m,对杆件底部进行相同的喷砂处理后,杆件中部的最大变形开始下降33m左右。

### 6.3 结果分析

利用分析方程对试验结果进行了验证,在构件整体尺寸不变的时候,以薄壁和底部厚度为自变量,构件在F方向上的中性面位置与截面惯性矩发生变化,试样长度方向的弯曲中性面离构件底面的距离为10.5mm。尽管喷砂的应力作用仅为120m,但是它所引起的零件变形相当于2倍于铣削时的变形。在试验过程中,研究了铣削、喷砂等工艺对薄壁零件全局应力分布的影响,发现铣削、喷砂等工艺都将引起零件全局应力幅值及分布的变化,使得零件在原结构中的应力平衡被打破,使得零件的总力矩不再为零,进而引起零件的变形,并使零件的应力分布趋于平衡。在经过铣削加工和喷砂处理后的框架件表面,会出现一层深度较浅但强度较高的压应力,其作用深度约为120m。通过对应力分布的测试,可以得到构件在初始态、加工后、薄壁喷砂后和底部喷砂的4个状态下总应力。

### 结束语

本文提出的薄壁件铣削工艺有限元模型,考虑了粗精加工时坯料的初始残余应力再分配与切削力共同对侧壁工艺变形的影响,与现有有限元模型相比,其工艺仿真更加接近于工程实际。由于坯料初始残余应力过大,在靠近侧壁末端的自由端处会造成加工变形的脉动,从而诱发或加剧了切割振动。因此,为了降低成形过程中的变形,需要对坯料的初始残余应力进行严格的控制。

### 参考文献

- [1]廖凯,张箫笛,车兴飞,等.铝合金薄壁件加工变形的力学模型构建与分析[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(5):7.
- [2]毕运波,柯映林,董辉跃.航空铝合金薄壁件加工变形有限元仿真与分析[J].浙江大学学报:工学版,2008,42(3):6.