



薄壁结构件铣削加工 变形理论及其应用

■ 汤爱君 著



國防工業出版社
National Defense Industry Press

薄壁结构件铣削加工 变形理论及其应用

汤爱君 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书在高速切削加工技术及薄壁结构件工艺特点基础上,对薄壁结构件的切削变形进行了深入的探讨,阐述了薄壁结构件切削加工过程中的力学基础,弹性变形、弹塑性变形理论和原理,并研究了薄壁结构件切削加工变形的应用技术,建立了薄壁件不同刀具位置处的三维稳定性模型,为薄壁零件铣削加工变形的控制和工艺参数优化提供理论依据。

本书可作为学习金属切削原理、机床振动、CAD/CAM 技术、机械加工技术、金属切削变形的大学高年级学生、研究生的教材,也可作为从事金属切削力学和动力学、CNC 技术的科研工作者以及从事实际生产制造的工程师的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

薄壁结构件铣削加工变形理论及其应用/汤爱君著. —
北京:国防工业出版社,2014. 2
ISBN 978-7-118-09443-5

I. ①薄... II. ①汤... III. ①薄壁结构—结构构件—
铣削—研究 IV. ①TG54

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 110373 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 5 $\frac{1}{4}$ 字数 156 千字

2014 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 56.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前 言

继计算机数字控制(Computer Numerical Control, CNC, 简称数控)技术之后,高速切削加工给机械制造业带来了又一次革命性的变化。其巨大的吸引力在于实现高效加工的同时,达到了原来普通数控难以达到的加工精度和表面质量。因此,高速切削加工被首先应用在航空航天工业,为了最大限度地减轻重量和满足其他一些要求,许多航空航天零件采用薄壁、细筋结构,其具有重量轻等突出优点,工程应用日益广泛。薄壁结构受力复杂,难以按照经典理论进行受力分析;制造过程中极易发生变形、失稳和振动等问题,制造难度极大,是国际上公认的复杂制造工艺难题之一。目前,薄壁零件的制造技术水平,已成为衡量世界各国航空航天技术水平的重要标志之一。

本书试图在总结过去研究工作的基础上阐述薄壁零件切削加工过程中的弹、塑性变形的理论基础、原理及应用实践,为薄壁零件铣削加工变形的控制和工艺参数优化提供理论依据。全书共分为7章。第1章主要介绍了高速切削加工技术及切削过程中的切削力计算;第2章主要介绍了薄壁零件的工艺特点及加工变形的影响因素;第3章介绍了薄壁零件切削加工变形过程中的力学基础,对薄壁件的应力和应变状态进行了分析,并引入了弯曲薄板功的互等定理;第4章主要介绍了薄壁零件在切削力作用下弹性变形的理论模型和边界条件,并通过有限元进行求解计算铝合金悬臂薄壁零件在切削力作用下的弹性变形;第5章主要介绍了薄壁零件发生弹塑性变形的微分方程组和边界条件,考虑了弯曲回弹现象对弹塑性变形的影响,并计算薄壁零件在一定条件下发生弯曲回弹时的回弹量;第6章主要介绍了薄壁零件铣削加工的三维稳定性模型,并用 Matlab 7.0 进行计算仿真,得到薄壁零件铣削颤振的轴向切深、径向切深和主轴转速的三维稳定性图;第7章主要介绍了薄壁零件铣削加工变形的应用技术,建立了薄壁件不同刀具位置处的三维稳定性模型,通过 Matlab 模拟出薄壁零件铣削加工过程中轴向切深、主轴转速和刀具位置的三维稳定性图。

本书以“基础理论—技术方法—应用实践”为框架,结构合理、清晰。在叙述上力求深入浅出、通俗易懂,相信会为读者的学习和工作带来一定的帮助。本书是为学习金属切削原理、机床振动、计算机辅助设计/计算机辅助制造(CAD/CAM)

技术、机械加工技术、金属切削变形的大学高年级学生、研究生和从事实际生产制造的工程师编写的;也可作为从事金属切削力学和动力学、CNC 技术的科研工作者的参考书。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目(51105233、51105172)、山东省高等学校科技计划项目(J11LD09、J12LB06)、国家博士后基金项目(2011M501126)、山东省博士后基金项目(201003074)的资助,特此向支持和关心作者研究工作的所有人表示衷心的感谢。还要感谢教育、支持、帮助作者多年的恩师刘战强教授;感谢出版社同仁为本书出版付出的辛勤劳动。书中有部分内容参考了有关单位或个人的研究成果,均已在参考文献中列出,在此一并致谢。

由于薄壁件的切削加工技术追求的目标是现代较新的理论和方法,这给本书的撰写增添了难度,再加上作者水平所限,虽几经修改,书中错误和缺点在所难免,欢迎广大读者不吝赐教。

作者

2014 年 1 月

目 录

第 1 章 高速切削加工技术	1
1.1 高速切削加工技术概述	1
1.2 高速切削加工的特点	3
1.3 高速切削加工中的切削力	4
1.3.1 切削力的理论公式	5
1.3.2 切削力的指数公式	5
1.3.3 单位切削力公式	6
1.3.4 影响切削力的因素	6
第 2 章 薄壁结构件的工艺特点及分析	8
2.1 薄壁结构件的工艺特点	8
2.2 薄壁零件切削加工变形的研究	9
2.3 薄壁结构件加工变形的影响因素	10
2.4 薄壁件加工变形的控制措施	12
第 3 章 薄壁零件切削加工变形的力学基础	15
3.1 金属切削变形理论	15
3.2 材料加工变形的力学基础	17
3.2.1 应力状态分析	17
3.2.2 应变状态分析	21
3.2.3 弯曲薄板功的互等定理	25
第 4 章 薄壁零件铣削加工的弹性变形	31
4.1 薄壁零件铣削过程中的变形	31
4.2 薄壁零件铣削弹性变形的基本假设	32
4.3 薄壁零件铣削的线载荷	33
4.4 薄壁零件铣削弹性变形的微分方程	34
4.5 薄壁零件铣削弹性变形的影响因素	37
4.5.1 变形研究总体方案	37
4.5.2 线载荷大小对薄壁零件铣削最大变形的影响	39

4.5.3	铣刀切削位置对薄壁零件铣削最大变形的影响	39
4.5.4	壁厚对薄壁零件铣削最大变形的影响	42
第5章	薄壁零件铣削加工的弹塑性变形及弯曲回弹	44
5.1	薄壁零件铣削的弹塑性变形微分方程与边界条件	44
5.1.1	线载荷变化对薄壁零件铣削弹塑性变形的影响	47
5.1.2	铣刀切削位置的变化对薄壁零件铣削弹塑性变形的影响	48
5.1.3	壁厚对薄壁零件铣削最大变形的影响	50
5.2	薄壁零件的弯曲回弹	50
5.2.1	薄壁弯曲变形过程中的应力分析	51
5.2.2	薄壁零件弯曲回弹的计算分析	53
5.2.3	薄壁零件弯曲回弹的影响因素	57
5.3	薄壁零件铣削加工弹塑性变形的仿真与试验	58
5.3.1	薄壁零件铣削加工弹性变形的仿真	58
5.3.2	薄壁零件铣削加工变形的试验验证	60
第6章	薄壁零件铣削系统的三维稳定性	63
6.1	动态铣削模型	63
6.2	薄壁零件铣削稳定性预测的运动微分方程	68
6.3	薄壁零件铣削稳定性的极限条件	69
6.4	薄壁零件铣削的三维稳定性	70
第7章	薄壁件铣削加工变形的应用技术	73
7.1	薄壁零件切削中的“让刀”现象	73
7.2	刀具不同加工位置处三维稳定性图的数值仿真	74
7.3	薄壁零件铣削不同位置时的颤振稳定性的试验验证	76
附录	主要符号及其单位	82
参考文献		84

第1章 高速切削加工技术

继 CNC 技术之后,高速切削加工给机械制造业带来了又一次革命性的变化。其巨大的吸引力在于实现高效加工的同时,达到了原来普通 CNC 技术难以达到的加工精度和表面质量。因此,高速切削加工被首先应用在航空航天工业,为了最大限度地减轻质量和满足其他一些要求,许多航空航天零件采用薄壁、细筋结构,其具有质量轻等突出优点,工程应用日益广泛。薄壁结构受力复杂,难以按照经典理论进行受力分析;制造过程中极易发生变形、失稳和振动等问题,制造难度极大,是国际上公认的复杂制造工艺难题之一。目前,薄壁零件的制造技术水平,已成为衡量世界各国航空航天技术水平的重要标志之一。

目前,在航空航天工业生产中,一些大型复杂结构零件(如飞机的大梁、隔框、壁板)普遍采用了整体化结构设计,利用整块毛坯“掏空”加工而成。大型客机、大型运输机、战斗机中已大量采用这种结构^[1-3],使得飞机机体零件数量大大减少,减小了飞机装配工作量,提高了装配协调性,简化了生产管理,缩短了飞机生产周期,而且飞机机体的结构效率成倍地提高。但是这类薄壁件通常具有材料去除率高、结构复杂、加工精度和表面质量要求高、刚度差等加工特点。在实际加工过程中,随着薄壁零件厚度的减小,零件的刚性也会相应的降低,工件在切削力、夹紧力、切削热、残余应力等因素的作用极易变形,从而引起加工尺寸偏差的现象,很难满足零件加工质量的高要求。

1.1 高速切削加工技术概述

高速切削(High Speed Machining, HSM 或 High Speed Cutting, HSC)的概念源于德国学者 Carl J. Salomon 博士在 20 世纪二三十年的研究。Salomon 博士发现^[4]:在加工有色金属时,随着切削速度的提高,切削温度上升,但达到临界切削速度后,随着切削速度的进一步增加,切削温度反而下降,如图 1-1 所示,越过这个临界速度后刀具寿命提高。

随着材料、电子技术,计算机等现代科学技术的发展,机床高速主轴、高性能伺服控制系统和新刀具材料等关键技术得到重大突破,在 20 世纪 90 年代,高速

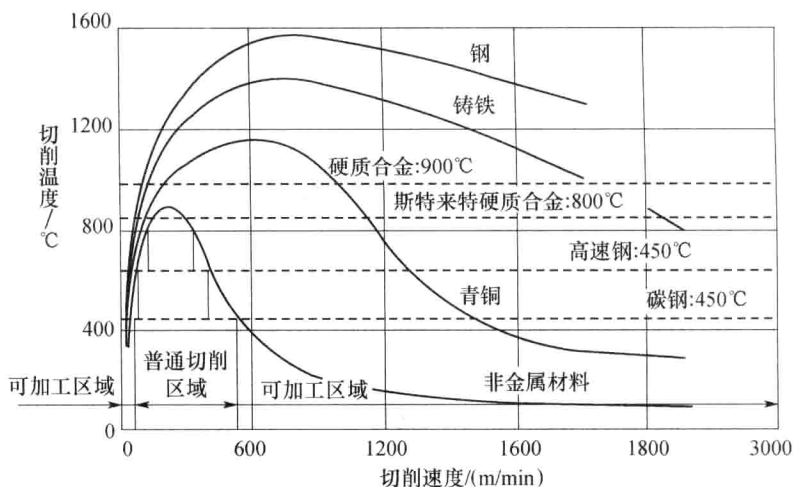


图 1-1 Salomon 曲线

切削加工技术从理论和试验阶段进入工业应用阶段,并且快速发展。高速切削加工具有切削力小、切削热少、材料切除率高、加工精度高等优点,因此广泛应用于弱刚度薄壁件的加工。

随着科技的进步和经济的发展,高速切削加工技术越来越广泛地应用于航空、航天、武器装备和交通工具制造业等领域,取得了良好的经济效益并得到了快速发展。在国外制造技术水平较高的国家,如美国、日本和西欧一些国家,铝合金、钛合金薄壁件的加工技术已积累了一定的经验。高速/超高速切削技术已经逐步应用于航空航天制造领域。其不仅在机床、夹具、刀具及工件材料等方面具有一定的先进性;而且在薄壁件的数控加工技术研究方面也有较深的理论研究和实践积累。

相比发达国家,我国高速切削加工技术的研究和应用较晚,目前的研究主要集中在切削机理、切削力、切削热和切削参数等方面。我国根据《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》设立了“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项,这对我国高速切削技术的研究和发展具有重要意义。在现代工业快速发展的今天,作为一种先进的制造技术,高速切削以自己独特的优势有着强大的生命力和广泛的应用前景。

薄壁件由于刚性差,结构复杂,在加工中极易发生变形,加工质量难以保证。目前一般采用数控车削和铣削方式进行加工,一般步骤是粗加工、半精加工、校正、时效、精加工,零件的生产周期长、废品率高。而高速加工采用小切削量、高切削速度的切削形式,不仅提高了加工效率,而且降低了切削力,大部分切削热

被切屑带走,从而大大减小了工件的变形。相对于普通数控加工,缩短了生产周期、减小了加工变形、提高了加工精度。

1.2 高速切削加工的特点

近年来,由于高速切削加工和常规切削加工相比,在提高生产率、减少热变形和切削力以及实现高精度、高质量零件加工方面具有显著的优越性,因此,高速切削加工越来越引起人们的关注。

1. 材料切除率高

高速加工比常规加工单位时间材料切除率可提高 3~6 倍,因而零件加工时间通常可缩减到原来的 1/3,从而提高了生产率和设备利用率。

2. 切削力低

和常规切削加工相比,高速切削力至少降低 30%,尤其是径向切削力的大幅度减少,这对于加工刚性较差的零件(如细长轴、薄壁件等)来说,可减少加工变形,提高零件加工精度。同时,按高速切削单位功率比,材料切除率可提高 40% 以上,有利于延长刀具使用寿命,通常刀具耐用度可提高约 70%。

3. 减少热变形

高速切削加工过程,95% 以上的切削过程所生产的热量将被切屑带离工件,工件积聚热量减少,零件不会由于温度升高导致翘曲或膨胀变形。因此,高速加工特别适合于加工容易发生变形的零件。

4. 加工效率高

高速切削加工允许使用较高进给率,比常规切削加工提高 5~10 倍,可大大提高加工效率,缩短生产周期。

5. 实现高精度加工

应用高主轴转速、高进给速度的高速切削加工,其激振频率特别高,已远远超出“机床一刀具一工件”工艺系统的固有频率范围,使加工过程平稳、振动较小,可实现高精度、低粗糙度加工。高速切削加工获得的工件表面质量几乎可与磨削加工相比,残留在工件表面上的应力也很小,故高速切削加工可直接作为最后一道精加工工序。

6. 增加机床结构稳定性

高速切削加工由于温升及单位切削力较小,增加了机床结构的稳定性,有利于提高加工精度和表面质量。

7. 良好的技术经济效益

采用高速切削加工将能取得较好的技术经济效益,如缩短加工时间,提高生

产率;加工刚性差的零件;提高了刀具耐用度和机床利用率;零件加工精度高,表面质量好,工件热变形小;刀具成本低,节省了换刀辅助时间及刀具刃磨费用等等。

虽然高速加具有上述种种优点,但由于高速加工是一项正在不断发展不断摸索的新技术,目前尚存在以下不足。

(1) 较高的硬件费用。高速加工机床较为昂贵,对刀具的材料、切削性能、动平衡等要求很高,固定资产投资较大,刀具费用也相应提高。

(2) 维修费用较高。由于高速切削中,机床加速减速频繁,加速度较大,载荷增加,加剧了导轨、滚珠丝杠和主轴轴承的磨损,导致维修维护费用也相应提高。

(3) 需要高级的编程与操作人员。高速加工编程与操作和传统的数控机床相比,对编程人员及操作者提出了更高的要求。目前我国普通数控编程与操作人员尚相对缺乏,符合要求的高速加工编程人员及操作人员更是不足。

(4) 需要特别的工艺知识、专门的编程软件、快速数据传输接口。高速加工的工艺编排、CAD/CAM 造型及编程软件、热工参数确定及数据传输与传统加工不同。在对工艺、软件、接口提出了更高要求的同时,如何有效利用已有资源也成为一个问题。

(5) 对安全性要求很高。由于高速加工时紧急状况下的急停实际上不可能实现,人工操终失误、硬件或者软件错误都会导致很严重的后果,所以对机床硬件、控制系统等都提出了很高的要求。高速加工机床通常需要具有防弹功能的防护板和防护玻璃,严格控制刀具伸出量;不能使用未经过动平衡的刀杆或者刀具,同时需要定期检查刀具、刀杆和螺钉是否存在疲劳裂纹,选择刀具时必须注意刀具许用的最高转速等。

(6) 调试周期较长。高速加工对系统稳定性的要求很高,机床硬件、数控软件、CAD/CAM 等需要形成一个完整的系统,缺一不可,且必须经常维护在一个良好的状态。故设备初期的配套、安装调试、后期的维护保养等都要求很高,需要耗费较长的时间。

1.3 高速切削加工中的切削力

金属切削时,刀具切入工件,使被加工材料发生变形成为切屑所需的力,称为切削力。高速切削薄壁件时,由于切削速度和进给速度很高,切削过程储备了高动能和高惯量,因此稍微有点干扰就会引起切削力的变化,影响切削过程的稳定性;同时切削力也直接影响薄壁件的加工变形。

切削力来源于三个方面^[5] (图 1-2): 克服被加工材料对弹性变形的抗力; 克服被加工材料对塑性变形的抗力; 克服切屑对刀具前刀面的摩擦力和刀具后刀面对过渡表面和已加工表面之间的摩擦力。

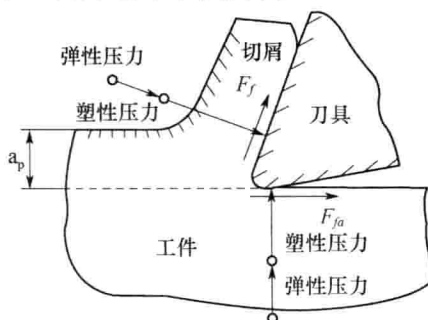


图 1-2 切削力的来源

1.3.1 切削力的理论公式

用材料力学的原理^[6], 可推导出切削力的理论公式:

$$F_t = \tau_s h_D b_D (1.4 \Delta_h + C) = \tau_s a_s f (1.4 \Delta_h + C) \quad (1-1)$$

式中: C 为与前角有关的系数, 如表 1-1 所列。

表 1-1 不同前角时的系数

前角/ $^{\circ}$	-10	0	10	>20
系数 C	1.2	0.8	0.6	0.45

由上式可看出各因素对切削力的影响, 反映了材料性能 (τ_s)、切屑变形 (Δ_h)、切削用量 ($a_s f$)、切削层参数 ($h_D b_D$) 以及刀具前角之间的内在联系。但在公式推导过程中简化了许多因素, 如切削温度、内摩擦、刀刃钝圆半径及材料内部缺陷等, 因而计算出的切削力不够精确, 与实际情况出入较大。

1.3.2 切削力的指数公式

削力的指数公式由试验总结而得, 属经验公式的一种。指数公式的建立, 一般要分两个步骤进行, 首先采用单因素法 (或多因素法) 进行切削试验, 采集一定切削条件下的切削力数据; 然后, 对所采集数据采用一定的方法 (如图解法) 进行处理加以归纳便可得指数公式^[7,8]。

用指数公式计算切削力时, 考虑到各因素对切削力的影响, 可用修正系数表示。当所求切削条件与试验条件不符时, 在试验公式的基础上乘一个修正系数,

三个分力的指数公式为

$$F = C_F v^{k_1} a_a^{k_2} f^{k_3} a_r^{k_4} d \quad (1-2)$$

式中: C_F 为决定于加工材料、切削条件的系数; v 为铣削速度; a_r 为径向切削深度; d 为铣刀直径; f 为进给量; k_1, k_2, k_3, k_4 为待定参数, 它们的大小可在多次切削试验后, 通过多元线性回归分析方法和最小二乘估计法进行处理。其中, 铣削速度为

$$v = \frac{\pi d_0 n}{1000} \quad (1-3)$$

式中: n 为主轴转速 (r/min)。

1.3.3 单位切削力公式

生产中较为方便的是利用单位切削力公式计算切削力, 单位面积上的主切削力为单位切削力, 用 K_t 表示, 即

$$K_t = \frac{F_t}{A_c} = \frac{F_t}{a_a f} \quad (1-4)$$

式中: A_c 为切削面积。

试验表明^[9], 不同的工件材料, 单位切削力不同; 同一材料, 切削用量、刀具几何参数不同, 单位切削力也不同。

1.3.4 影响切削力的因素

由于切削力来源于切削层、切屑、工件表面层金属的弹性变形和塑性变形产生的抗力和与切屑、工件表面间的摩擦阻力, 因此, 凡影响变形和摩擦的因素都要影响切削力。

1. 工件材料

工件材料的强度、硬度越高, 则材料的剪切屈服强度越高, 切削力增大, 虽然随工件材料的强度、硬度提高, 切屑变形略有下降, 但总的说来切削力仍是增大的。

工件材料的塑性及硬化能力也影响切削力。强度、硬度相近的材料, 如其塑性较大, 则强化系数较大, 与刀具间的摩擦系数也较大, 故切削力增大。

2. 切削用量

1) 切削深度 a_a 和进给量 f

切削深度 a_a 或进给量 f 加大, 均使切削力增大, 但两者的影响程度不同。但是, 切削深度 a_a 加大时, 切削厚度压缩比不变, 切削力成正比例增大; 进给量 f

加大时,切削厚度压缩比也有降低,故切削力不成正比例增大。因此,切削加工中,如从切削力和切削功率角度考虑,加大进给量比加大切削深度有利^[10,11]。

2) 切削速度

加工塑性金属时,在中速和高速下,随速度的增大,切削温度升高,摩擦系数下降,切屑变形减小,因此切削力会有所下降^[12]。

3. 刀具材料、切削液和刀具磨损的影响

刀具材料与被加工材料间的摩擦系数影响摩擦力的变化,从而影响切削力的变化。相同的切削条件下,陶瓷刀具的切削力最小,硬质合金次之,高速钢刀具的切削力最大。原因是陶瓷刀具导热系数小,在较高的切削温度下摩擦系数降低,所以切削力较小。

切削加工过程中,合理的采用切削液可以有效地减小摩擦,使摩擦力降低,从而减小切削力。实践证明,“所用的切削液的润滑性能越高,切削力的降低越显著”;同时,在切削液中添加使表面张力降低的添加剂,可以使切削液更容易渗透到被加工材料塑性变形区的细微裂纹内部,从而降低强化系数,减小切削力。

刀具前刀面磨损使得刀具前角增大,从而减小了切削力;而后刀面磨损导致后刀面与工件接触面积增大,从而使切削力增大。当前刀面和后刀面同时磨损时,切削力在切削开始时减小,随后增大^[13-17]。

第2章 薄壁结构件的工艺特点及分析

薄壁结构件种类繁多,广泛的应用于航空、能源、船舶等制加工制造业,尤其对于追求高强度低质量的航空领域,更是常见。这类薄壁构件的特点:结构形状复杂,外形协调要求较高,零件轮廓尺寸相对截面尺寸较大,加工余量大,相对刚度低,加工工艺性差,不易控制加工精度。

2.1 薄壁结构件的工艺特点

由各种薄型板或壳及加强筋条构成的轻量化结构即是薄壁零件。对于一些薄壁件,其外形直径 D 与壁厚 δ 之比通常为 $D/\delta = 50 \sim 200$,而壁厚为 $0.25 \sim 2\text{mm}$;对于薄壁杆件来讲,其几何特征则是某一个方向的几何尺寸 L 远大于垂直该方向横截面上的最大尺寸 d (如直径、高、宽等),同时横截面上的最大厚度 $t < d$,通常情况下 $t/d < 0.1$, $d/L < 0.1$ 。用来制造薄壁件的材料强度很高,而且质量很轻。通常薄壁产品的外形都很美观,所以薄壁件的应用越来越广泛。

薄壁件的种类很多,在航空、能源、船舶等制造加工业得到广泛的应用。尤其是在航空领域,因其追求高强度低质量。飞机采用的薄壁结构普遍是由薄型板件和加筋构件组成的结构。板件有蒙皮、腹板、隔板、地板等;加筋构件有桁条和梁、肋、框的缘条等。桁条和缘条属于薄壁杆件,由挤压的或弯制的型材制成。球形、柱形容器和矩形贮箱等不加筋的薄壁壳体,也属于薄壁结构,但受力分析与加筋薄壁结构不同,属一般板壳力学研究的对象。

为了减小和避免薄壁件的变形,很多学者进行了特定的加工工艺研究。关于加工工艺方面的研究,主要有以下两个方面。

(1) 使用特殊的机床与刀具进行薄壁零件的加工。如日本的岩部育洋^[18]采用双轴机床分别从两侧壁加工,从而抵消了薄壁的变形。文献[19-22]中提出了采用刀杆较细的立铣刀进行侧壁加工,避免刀杆损坏已加工的表面。

(2) 采用多种工艺方法进行薄壁零件的加工,主要有精加工最后一次走刀后,在没有进给量的情况下进行光切,并用手工打磨。该方法虽然能够将大部分的残余材料切除掉,但大大增加了加工工时,降低了生产率。对刀具切削用量及

走刀路径进行优化,达到减小变形的目的。该方法虽然在国外文献中被多次提及,但没有具体的工艺指导文件供参考。从工装方面考虑,采用真空夹具、石膏填充法及低熔点合金填充法等工艺方法加强支撑,进而达到减小变形、提高精度的目的。

2.2 薄壁零件切削加工变形的研究

在国外制造技术水平较高的国家,如美国、日本和西欧一些国家,铝合金、钛合金薄壁件的加工技术已积累一定的经验。高速/超高速切削技术已经逐步应用于航空航天制造领域。其不仅在机床、夹具、刀具及工件材料等方面具有一定的先进性;而且在薄壁件的数控加工技术研究方面也有较深的理论研究和实践积累。美国三波公司依托密西根大学等若干所著名大学,共同研究和开发能够有效抑制整体结构件数控加工变形的工艺路线优化理论和有限元模拟软件^[23]。法国巴黎航空工业学院与德国宇航局针对航天飞行器整体结构件设计与制造问题,联合建立了专门的强度试验室,深入研究加工变形的工艺控制和安全校正等问题^[24]。

对于具体的薄壁结构零件的加工,为了解决单一主轴加工零件的变形问题,日本的岩部洋育等人提出了平行双主轴加工方案,利用工件两侧受力为对称力,除了微量的刀具变形引起的加工误差以外,工件的加工倾斜变形基本上可以消除,有效的解决单一主轴加工零件的变形问题。Tlustý 等人提出了充分利用零件整体刚性的切削加工方案,有效控制了零件的加工变形,同时提高了生产率^[25]。Tlustý 等人在研究动态铣削的基础上,还提出利用合理的大长径比刀具,可以有效地解决较深的型腔和侧壁的铣削加工问题,以获得较大的金属切除率和较高的表面完整性^[26]。

日本学者 Haruki 等人提出了将低熔点合金注入薄壁结构型腔,从而大大提高工件的刚度,有效地解决薄壁结构零件的加工变形问题,具有很高的加工精度^[27]。Kline 等人研究了三边夹紧固定,一边自由边界条件下的矩形薄壁板的铣削变形问题,并进行理论建模,模型特点在于同时将刀具与工件变形进行考虑,且因工件夹持刚度较大,忽略了刀具与工件变形的耦合效应^[28]。英国学者 Ratchev 对于薄壁结构零件的铣削加工精度和误差进行了大量研究。在铣削过程中,由于在不同位置时,加工条件不断变化,切削力的大小和方向也随时变化,Ratchev 使用有限元软件模拟和理论分析,提出了加工精度的预测和误差补偿方法,并通过试验进行了验证^[29-36]。

国内有关航空航天整体结构件的加工变形预测及控制方面的研究主要集中

在南京航空航天大学、北京航空航天大学、西北工业大学、浙江大学和山东大学等院校。浙江大学的董辉跃、柯映林等人综合考虑了薄壁件粗精加工工序,建立了薄壁件铣削加工全过程三维有限元模型,研究了残余应力施加、切削力建模及动态加载、材料去除等加工过程建模所涉及的关键技术^[37,38]。南京航空航天大学的武凯、何宁等人采用数值模拟技术研究了框体结构零件的腹板、侧壁加工变形规律及其变形控制方案,提出了大切削深度法和分布环切法可以充分利用薄壁件自身刚性以减小加工变形,提高加工精度^[39-42]。

北京航空航天大学的梅中义、王运巧等人研究了飞机弧形薄壁件的数控加工变形情况,并分析了数控加工过程中的切削力、残余应力和装夹布局对加工变形的影响,并提出了相应的解决方案^[43-45]。西北工业大学的万敏、张卫红等人利用工件的原始有限元网格模型,针对薄壁件铣削过程加工误差预测,建立了一种快速有效的材料去除仿真模型^[46-49]。山东大学的唐志涛、刘战强等人基于有限变形理论、虚功原理和更新的拉格朗日公式建立了热弹塑性本构方程,导出了热弹塑性大变形耦合控制方程,并建立了正交切削加工铝合金 7075-T7451 有限元模型,对切屑形态、切削力、切削温度以及应力场和应变场等物理量的分布进行了有效预测^[50,51]。

2.3 薄壁结构件加工变形的影响因素

薄壁结构零件广泛应用于航空航天工业中,主要由若干侧壁和腹板组成,结构形状一般比较复杂,外形协调要求高,零件外轮廓尺寸相对较大,加工余量大,刚性较低,加工工艺性差,容易产生加工变形,且变形的形式多样、控制难度大,加工精度很难很难得到保证。加工精度的主要影响因素有工件材料特性和结构特性、毛坯初始残余应力、切削力和切削热、装夹因素及加工路径等,如图 2-1 所示。

1. 零件材料及结构的影响

不同的材料可加工性是不同的,在加工过程中切削力和产生的切削热也是不同的,从而导致工件的变形也是不同的;材料相同的零件,结构不同时,比如有加强筋的薄壁件和没有加强筋的薄壁件,用相同的加工工艺加工后的变形也是不同的。铝合金的弹性模量小,屈服比大,在加工过程中容易产生回弹变形,而且该类零件基本上都是典型的薄壁零件,这更加大了其变形的程度。

2. 残余应力的影响

残余应力有两种情况:一种是初始残余应力;另一种是加工残余应力。初始