



薄壁零件铣削加工 三维稳定性及参数优化

■ 汤爱君 著



國防工業出版社
National Defense Industry Press

薄壁零件铣削加工三维 稳定性及参数优化

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金属切削力学基础上,对薄壁结构件的切削颤振稳定性进行了深入的探讨,阐述了薄壁零件铣削颤振产生的机理,建立了铣削力模型和颤振三维稳定性模型,分析了薄壁零件铣削三维稳定性的影响因素和工艺参数的优化选择。运用切削理论和数值计算方法,寻求最优的切削用量组合,可以获得稳定切削条件下薄壁零件的最大材料去除率,实现高速铣削加工效率和加工精度的统一。

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、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 技术的科研工作者和从事实际生产的制造工程师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

薄壁零件铣削加工三维稳定性及参数优化 汤爱君著. —北京:国防工业出版社,2014. 7
ISBN 978-7-118-09442-8

I. ①薄... II. ①汤... III. ①薄壁件—铣削—操纵稳定性—研究 IV. ①TG54

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 110377 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 6 $\frac{3}{4}$ 字数 178 千字

2014 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 58.00 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

国际市场激烈的竞争压力迫使各航空航天制造企业更高效地加工零件。加之先进刀具、高端机床及先进计算机数字控制(CNC,简称数控)系统的不断出现,促使高速加工(HSM)技术在航空航天制造业得以广泛应用。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、变厚度、复杂曲面、细筋结构,其具有质量轻等突出优点,工程应用日益广泛。由于薄壁结构零件外轮廓尺寸相对截面尺寸较大,刚性较低,铣削加工余量大,加工工艺性差,在切削力的作用下很容易发生加工颤振,导致不稳定性加工。金属切削过程中刀具与工件之间产生的切削振动产生原因和发生、发展规律与切削加工过程本身及金属切削机床动态特性都有着内在的本质联系,影响因素很多,是一个非常复杂的非线性机械振动现象。

本书试图在总结过去研究工作的基础上阐述薄壁零件铣削加工过程中的颤振稳定性理论及参数优化,为薄壁零件铣削加工稳定性和工艺参数优化提供理论依据。全书共分为6章。第1章主要介绍了高速切削加工技术的研究内容及研究现状;第2章主要介绍了直角切削力学和斜角切削力学的基本原理;第3章介绍了切削颤振产生的机理及影响因素,并对切削稳定性的研究现状进行了综述;第4章介绍了基于机械力学的整体立铣刀瞬态切削力建模思想和步骤,建立了整体立铣刀的瞬态切削力模型;第5章主要介绍了针对薄壁零件铣削的三维稳定性预测数学模型,绘制了轴向切削深度、径向切削深度和主轴转速对切削颤振影响的三维稳定性图;第6章主要介绍了铣削力系数和铣刀参数之间的关系,分析了薄壁零件铣削三维稳定性的影响因素和工艺参数的优化选择,研究了稳定切削条件下薄壁零件的最大材料去除率问题。

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、CAD/CAM技术、机械加工技术的大学高年级学生、研究生和从事实际生产的制造工程师编写的;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同志表示衷心的感谢。作者还要感谢教育、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 3 月

目 录

第 1 章 高速切削加工技术	1
1.1 高速高效切削加工技术概述	1
1.2 高速切削机理的研究内容	3
1.3 高速切削加工技术的研究现状	4
第 2 章 金属切削力学	8
2.1 直角切削力学	8
2.2 斜角切削力学	12
第 3 章 铣削加工系统颤振机理及稳定性	15
3.1 切削振动的分类	15
3.2 切削颤振产生的机理	16
3.2.1 摩擦颤振产生机理与研究现状	17
3.2.2 再生颤振产生机理与研究现状	19
3.2.3 振型耦合型颤振产生机理与研究现状	23
3.3 切削颤振特性的影响因素	24
3.4 薄壁零件切削稳定性的研究	26
第 4 章 铣削力模型	28
4.1 常用的铣削力建模方法	28
4.2 整体立铣刀的铣削力模型	29
4.2.1 微元铣削力	30
4.2.2 切削区域的提取	33
4.2.3 整体铣削力	34
4.3 不同因素对铣削力变化的影响	35
4.3.1 铣削刀具几何参数的影响	35

4.3.2 切削参数对铣削力的影响	42
4.4 切削力测试平台	53
第5章 薄壁零件铣削加工的三维稳定性	55
5.1 薄壁零件的结构特点	55
5.2 铣削动力学模型	56
5.2.1 铣削动力学模型基本假设	58
5.2.2 动态铣削模型	60
5.2.3 薄壁零件铣削稳定性预测的运动微分方程	64
5.2.4 薄壁零件铣削稳定性的极限条件	64
5.3 薄壁零件的模态分析与参数识别	65
5.3.1 薄壁零件的模态分析	66
5.3.2 薄壁零件模态参数的测试和试验分析	69
5.4 薄壁零件铣削的三维稳定性图	71
第6章 薄壁零件铣削三维稳定性的影响因素和参数优化	75
6.1 铣削力系数的标定	75
6.2 铣刀几何参数对三维稳定性影响及参数优化	77
6.2.1 铣刀螺旋角对稳定性的影响及参数优化	77
6.2.2 铣刀法向前角对稳定性的影响及参数优化	80
6.2.3 铣刀齿数对稳定性的影响及参数优化	82
6.3 径向切削深度对铣削稳定性的影响	83
6.4 薄壁零件铣削去除率的影响因素	84
6.5 无颤振最大材料去除率	86
附录 主要符号及其单位	92
参考文献	94

第 1 章 高速切削加工技术

制造业是国民经济的物质主体和关系到国家安全的支柱产业,是国民经济高速增长的发动机,制造技术水平和设备制造能力的高低,是衡量国家科技水平和综合国力的重要标志。

薄壁零件由于其刚性好、比强度高、相对重量较轻等优点,已广泛应用于航空、航天、电子、模具等工业领域。高速切削是一种以比常规切削速度高 10 倍左右的切削速度对零件进行切削加工的先进制造技术。高速切削具有切削力小、切削热少、切削速度高、单位时间去除材料率大、加工精度高等特点,因而通常采用高速切削技术来加工薄壁件。

1.1 高速高效切削加工技术概述

高速切削加工的理念从 20 世纪初提出以来,经历近 70 年的理论与试验研究和探索以及刀具和机床技术的研究与发展。直至近年来,随着材料、信息、微电子、计算机等现代科学技术的迅速发展,大功率高速主轴单元、高性能伺服控制系统和超硬耐磨和耐热刀具材料等关键技术的解决和进步,从而使得高速切削加工技术在德、美、日等工业发达国家迅速发展。最突出的优点是有较高的生产效率和加工精度与表面质量,并降低生产成本。它已成为先进制造技术的一项全新的共性基础技术,是切削加工技术的发展方向,已在航空、汽车、模具等制造业中广泛应用,取得了重大的经济效益。对提高切削加工技术的水平,推动机械制造技术的进步具有深远的意义。

高速、高效切削加工的主要目的是提高生产效率和降低成本。它包括高速切削加工、高进给切削加工、大余量切削和高效复合切削加工等,其中高进给切削加工和大余量切削加工等称为高性能切削加工。高速切削加工技术中的“高速”是一个相对概念,不能简单地用某一具体的切削速度值来定义。对于不同的加工方法和工件材料与刀具材料,高速切削加工时应用的切削速度并不相同,图 1-1 所示为根据目前实际情况和可能的发展给出的不同工件材料的大致切削速度范围。

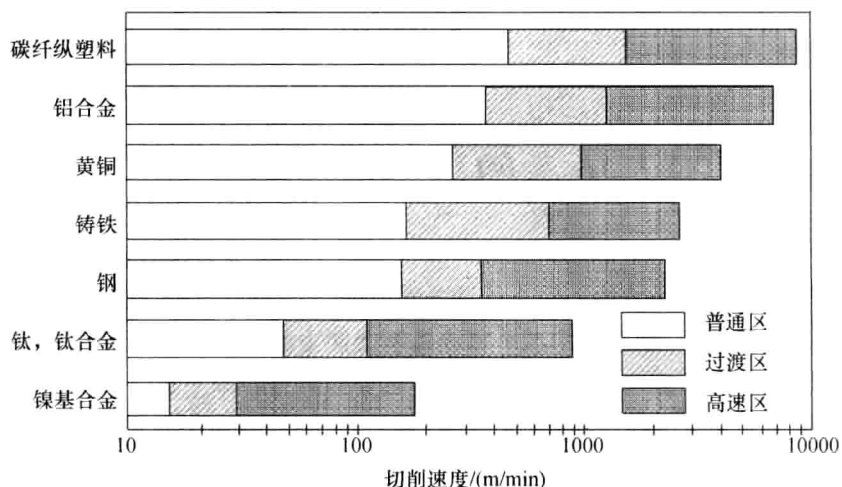


图 1-1 不同工件材料大致的切削速度范围

高速切削加工技术是在机床结构及材料、高速主轴系统、快速进给系统、高性能 CNC 系统、机床设计制造技术、高性能刀夹系统、高性能刀具材料及刀具设计制造技术、高效高精度测试技术、高速切削加工理论、高速切削加工工艺等诸多相关的硬件与软件技术均得到充分发展的基础上综合而成的,是诸多单元技术集成的一项综合技术,如图 1-2 所示。其中高速主轴系统、快速进给系统、CNC 系统、高速切削刀具材料、刀具结构和刀柄系统以及高速切削加工安全防护与监控技术等为其最重要的关键技术,它对高速切削加工技术的发展和运用,起着决定性的作用^[1]。

高速切削加工的优越性主要表现为:

(1) 随切削速度提高,单位时间内材料切除率增加,切削加工时间减少,大幅度提高加工效率,降低加工成本。

(2) 在高速切削加工范围,随切削速度提高,切削力随之减少。根据切削速度提高的幅度,切削力平均可减少 30% 以上,有利于对刚性较差和薄壁零件的切削加工。

(2) 高速切削加工时,切屑以很高的速度排出,带走大量的切削热,切削速度提高越大,带走的热量越多,大致在 90% 以上,传给工件的热量大幅度减少,有利于减少加工零件的内应力和热变形,提高加工精度。

(4) 从动力学的角度,高速切削加工过程中,随切削速度的提高,切削力降低,而切削力正是切削过程中产生振动的主要激励源;转速的提高,使切削系统的工作频率远离于机床的低阶固有频率,而工件的加工表面粗糙度对低阶固有

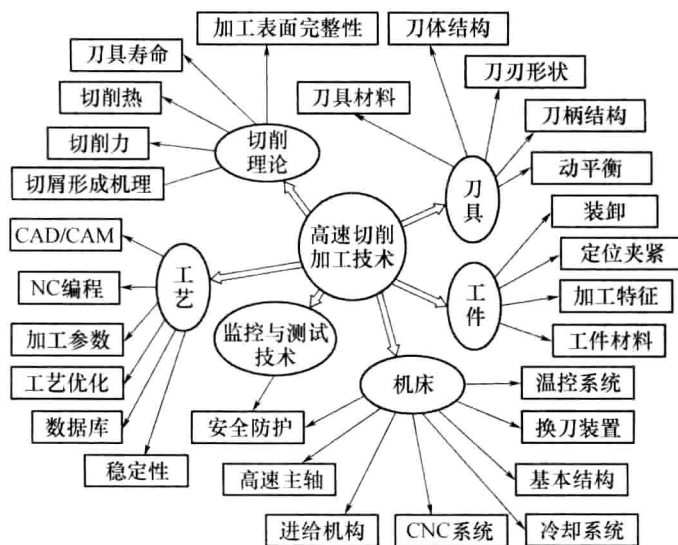


图 1-2 高速切削加工技术的研究体系

频率最敏感,因此高速切削加工可大大降低加工表面粗糙度。

高速切削加工是可以大幅度地提高切削速度以提高生产效率的,也可以通过改进刀具结构和几何形状,优化切削截面,提高机床动态稳定性。不是提高切削速度,而是加大切削进给,采用高进给或切除大余量等高性能切削加工以达到高效切削加工、达到大幅度提高生产效率的目的。

1.2 高速切削机理的研究内容

工业发达国家的高速加工的研究自 20 世纪 20 年代末由德国 Salomon 博士发起至今,经历了前期的设想和理论探索、高速加工机理探索、应用探索和应用研究等四个阶段。目前,工业发达国家关于高速加工技术的研究已逐步进入成熟应用阶段,高速切削加工技术已成为切削加工的主流。高速加工的相关技术水平正在逐步提高,并且在航空航天、汽车工业、模具及轻工产品制造等重要工业领域创造了显著的效益。例如,波音公司在其 JSF 工程中采用了高速加工技术,不仅成功解决了零件轻量化问题,而且比常规 CNC 加工方式节约 2/3 成本。其中 50% 源于切削速度的提高,50% 源于加工质量的提高。

目前高速切削机理的研究主要集中在以下方面。

1. 高速切削过程和切屑成型机理

采用科学试验和计算机模拟仿真两种方法,对高速切削加工中切削成型机

理、切削过程的动态模型、切削参数与切削过程的映射关系等进行研究。

2. 高速加工基本规律

对高速加工中切削力、切削温度、刀具磨损、刀具耐用度和加工质量等物理现象及加工参数对其影响规律进行研究,建立反映其内在联系的数学模型。试验方案设计和试验数据处理是该部分研究工作中需要解决的问题。

3. 各种材料在高速切削中的性能

不同材料在高速切削中表现出不同的特征,有必要研究各种工程材料在高速切削中的切削性能,包括轻金属、钢铁、复合材料和各种合金材料等。通过系统的试验研究和分析,建立数据库,以便于指导生产实践。

我国在高速加工技术方面的研究起步较晚,20世纪80年代中后期才开始关注到高速加工技术的巨大潜力和应用前景,并开始研究工作。1987年,北京理工大学、同济大学开始搜集整理有关高速加工的材料并开始相关的研究;20世纪90年代,国家自然科学基金资助了一系列有关高速加工技术的研究项目;1999年,我国生产出高速加工机床。近几年来,山东大学、同济大学、上海交通大学等在高速加工技术中的刀具磨损、高速主轴系统、快速进给系统等方面进行了研究,并取得一定成果。

与工业发达国家相比,我国有关高速加工技术的理论研究、实际应用研究以及技术普及等方面还有相当大的差距。主要由于一些关键技术如刀具材料技术、高速切削材料数据库、高速切削虚拟技术等相关技术相对缺乏;数控机床技术的普及和推广周期较长使得高速加工技术发展缓慢;高速加工刀具长时间依赖进口;高速加工机床操作人员、工艺规划人员对高速加工的认识不足,及有关高速加工技术的科研成果普及缓慢等。

1.3 高速切削加工技术的研究现状

高速切削加工技术经过半个多世纪的理论和应用研究与探索,人们清楚地认识到它在制造业的市场竞争日益剧烈中的巨大潜力。进入20世纪90年代以来,各工业发达国家陆续投入到高速切削加工技术的研究、开发与应用中来,尤其是高速切削机床和刀具技术的研究、开发,与之相关的技术也得到迅速发展,进给技术进一步提高,1993年直线电机的出现拉开了高速进给的序幕。快速换刀和装卸工件的结构日益完善,自动新型电主轴高速切削加工中心不断投放到国际市场。高速切削刀具的材料、结构和可靠的刀具与主轴联结的刀柄的出现与使用,标志着高速切削加工技术已从理论研究进入工业应用阶段。

高速切削加工技术的发展促进了机床高速化,2001年,北京国际机床展览

会(CIMT'2001)上机床最高主轴转速从1999年的,8000~12000r/min普遍提高到15000~20000r/min。现在加工中心主轴转速一般为15000~30000r/min,快进速度为30~60m/min,换刀时间为3~5s。齿轮机床的主轴最高转速也已提高到9000~12000r/min。目前,已有主轴最高转速达150000r/min,快速进给达120m/min,换刀时间为0.7~1.5s的不同的加工中心。高速切削刀具材料技术发展也很快,主要是金刚石(PCD)、立方氮化硼(CBN)、陶瓷刀具碳化钛氮TiC(N)基硬质合金(金属陶瓷)、涂层刀具和超细晶粒硬质合金刀具的品种及性能等都有很大的增加和提高;许多适应高速切削刀具的结构不断出现,促进高速切削加工技术的进步和应用。

最近十几年来,高速切削加工理论基础研究进一步深入,取得了新的进展。主要是锯齿状切屑的形成机理,极高速切削加工钛合金时切屑的形成机理,机床结构动态特性及切削颤振的避免,多种刀具材料加工不同工件材料时的刀具前刀面、后刀面和加工表面的温度以及高速切削时切屑、刀具和工件切削热量的分配,进一步证实大部分切削热被切屑所带走。切削温度的试验研究表明:现有的刀具材料高速切削加工时,不论是连续或断续切削均未出现Salomon理论中的“死区”。在这一阶段,高速硬切削加工得到进一步研究、发展和应用。与磨削加工比较,它有很多优越性,在替代磨削加工方面具有很大潜力。高速干切削加工日益受到重视,它对保护环境,减少消耗,降低成本具有重大作用。研究表明:高速干切削加工铸铁、钢、铝合金,甚至超级合金和钛都是可能的,但要根据工件材料特性,要合理设计切削条件,目前还在研究和发展之中。

高速切削加工技术已成为切削加工的主流,日益广泛的应用于模具、航空、航天、高速机车和汽车工业等,并取得了巨大的经济效益。模具制造工业中,德国、日本、美国等约有30%~50%的模具公司,用高速切削加工技术,加工EDM电极、淬硬模具型腔、塑料和铝合金模型等,加工效率高,质量好,减少了后续的手工打磨和抛光工序。在航空与高速机车行业,飞机的骨架与机翼、高速机车的车厢骨架均为铝合金整体薄壁构件,都需要切除大量的金属,从毛坯开始的切除量甚至达到90%,采用高速切削加工技术,加工时间缩短到原来的几分之一。汽车工业的发动机铝合金和铸铁缸体,广泛采用高速切削加工技术,大大地提高效率,降低成本。

我国高速切削加工技术研究起步较晚,20世纪80年代初,山东工业大学切削加工研究组结合陶瓷刀具材料的研究,比较系统地研究了Al₂O₃基陶瓷刀具高速硬切削(车和端铣)的切削力、切削温度、刀具磨损和破损、加工表面质量以及刀具几何形状等;工件材料包括45钢、T10A钢、高速钢、轴承钢、模具钢、渗碳淬硬齿轮钢等,硬度50~65HRC,切削速度为100~500m/min;建立了有关切削

力、切削温度模型、刀具磨损与破损理论、加工表面质量变化规律等。该研究成果 1986 年在生产中推广应用至今。

20 世纪 90 年代后,山东工业大学又先后相继研究了模具高速切削加工技术与策略,涂层刀具与 PCBN 刀具和陶瓷刀具等高速切削铸铁和钢的切削力、刀具磨损寿命、加工表面粗糙度以及高速切削数据库技术以及高速切削工具系统的安全设计等。北京理工大学研究了高速切削的刀具寿命与切削力,沈阳工业学院和重庆大学研究了高速切削机理,天津大学和大连理工大学研究了高速硬切削和切屑形成机理,上海交通大学与有关工厂研究了钛合金高速铣削工艺、薄壁件高速铣削精度控制、铝合金高速铣削表面的温度动态变化规律、硅铝合金高速钻削和铣削数据库等,广东工业大学研究了高速主轴系统和快速进给系统,南京航空航天大学研究了钛合金和高温合金的高速切削,东北大学研究了高速磨削技术,成都工具研究所研究了高速切削刀具的发展和产业化等。尽管我国高速切削加工技术的研究还有待于全面深入,但通过我国科技工作者的艰苦努力,高速切削加工和高速切削机床的基础理论研究取得了令人鼓舞的成就,对促进我国高速切削加工技术的发展起到了重大作用。

“九五”“十五”“十一五”期间我国高速、高效、高精度数控机床技术指标有了大幅度的提高。加工中心主轴转速普遍提高到 8000r/min ,最高可达 12000r/min ,数控车床提高到 $4000 \sim 6000\text{r/min}$,快速进给速度提高到 30m/min ,最高达 40m/min ,加工中心换刀时间减少到 $1.5 \sim 3\text{s}$ 。目前,主要差距在于机床关键功能部件的研究开发落后于市场需求,如转速 20000r/min 以上的大功率刚性主轴、无刷环形扭矩电机、大行程直线电机、快速响应数控系统等技术尚未掌握。各工业部门所需的高速加工中心基本上还是依赖进口,并已从国外引进了相当数量的高速加工中心。

我国高速切削刀具材料已有很大的发展,特别是陶瓷刀具,而且初步具备了开发高速切削刀具的能力,但金刚石、立方氮化硼、 TiC(N) 基硬质合金(金属陶瓷)、涂层刀具和超细晶粒硬质合金刀具的性能、质量、精度、寿命、品种与国外差距很大,高速切削刀具制造技术相对落后,还没有形成自己特色的高速切削刀具制造体系。国内超细晶粒硬质合金刀具和高性能高速钢刀具牌号少,专用牌号几乎没有;可转位刀片的槽型与模具的开发能力低,涂层技术也远远落后于国外工具厂;尚无 TiC(N) 商业牌号,更谈不上 TiAlN 、 MoS_2 等新型涂层和纳米级涂层。目前,我国应用最多的还是普通高速钢刀具和通用硬质合金刀具,几乎所有国际知名的工具厂商(如 Sandvik, Kennametal, Walter, Seco, Widia, Iscar, Mitsubishi, Igetalloy, Carboloy 等)都在国内设立了或独资或合资企业,除陶瓷刀具外,各种高速、高精度和高可靠性的金刚石、立方氮化硼、 TiC(N) 基硬质合金

(金属陶瓷)和涂层刀具以及刀柄系统 80% 以上由它们提供,占领了中国数控刀具 90% 以上的市场份额。

我国高速切削加工技术最早应用于轿车工业,是在 20 世纪 80 年代后期,相继从德国、美国、法国、日本等国引进了多条具有先进水平的轿车数控自动化生产线。例如,从德国引进的具有 90 年代中期水平的一汽大众捷达轿车和上海大众桑塔纳轿车自动生产线,其中大量应用了高速切削加工技术。生产线所用刀具材料以超硬刀具为主,依靠进口。采用 PCBN、Si₃N₄ 基陶瓷、Ti 基金属陶瓷、TiCN 涂层刀具加工高强度铸铁件,铣削速度达 2200m/min;采用 PCD、超细硬质合金刀具加工硅铝合金铸件,铣削速度为 2200m/min,钻削与铰削速度达 80 ~ 240m/min;采用 Si₃N₄ 基陶瓷、Ti 基金属陶瓷、TiCN 涂层刀具加工精锻结构钢件,车削速度达 200m/min;采用 Co 粉末冶金高速钢(表面 TiCN 涂层)整体拉刀、滚刀、剃齿刀以及硬质合金机夹专用拉刀加工各种精锻钢件、铸铁件,拉削速度 10 ~ 25m/min,滚齿速度 110m/min,剃齿速度 170m/min,大大提高了生产效率和加工精度。近年来,我国航空、汽车、模具等制造行业引进了大量加工中心和数控镗铣床,都不同程度地开始推广应用高速切削加工技术,其中模具行业和航空工业应用较多^[2]。

切削加工未来的发展趋势和技术目标:①超高速切削,机床的主轴转速达到 1 000 000r/min,铣削加工铝及其合金的切削速度达到 10 000m/min,铸铁达到 5 000m/min,加工普通钢达到 2 500m/min,钻削铝及其合金的转速 30 000 r/min,加工铸铁和普通钢的转速分别达到 20 000 r/min 和 10 000 r/min;②高性能切削,材料去除率大大提高,进给量增大,进给速度达到 20 ~ 50m/min,每齿进给量达到 1.0 ~ 1.5mm/齿,要求机床主轴的功率达到 100kW;③复合加工,需要对机床的结构、运动控制和刀具结构进行创新设计;④对毛坯提出更高要求,要求加工余量尽可能小且均匀。

高速高效切削加工未来的研究内容呈现出学科交叉融合的趋势:①与材料科学、摩擦学、微纳技术等交叉,研究高速切削摩擦学、高速切削刀具材料及其涂层技术;②与计算机技术、信息技术、人工智能等交叉,研究高速切削加工过程建模、仿真与高速切削数据库;③与信息技术、微纳技术、控制理论、测试技术等交叉,研究高速切削过程的监控技术。

第2章 金属切削力学

金属切削过程是刀具从工件表面切除多余的金属层、形成已加工表面的过程。也是工件的切削层在前刀面挤压下产生塑性变形、形成切屑而被切下来的过程。在切削加工中,刀具、工件之间的相对运动模式分为两种,即直角切削和斜角切削,如图2-1所示。直角切削的刀具运动方向与刀刃方向相互垂直;而斜角切削的刀具运动方向与刀刃方向成一夹角。直角切削模型的独立变量少,便于理论分析,且与斜角切削模型之间具有一定的转换关系^[3,4]。

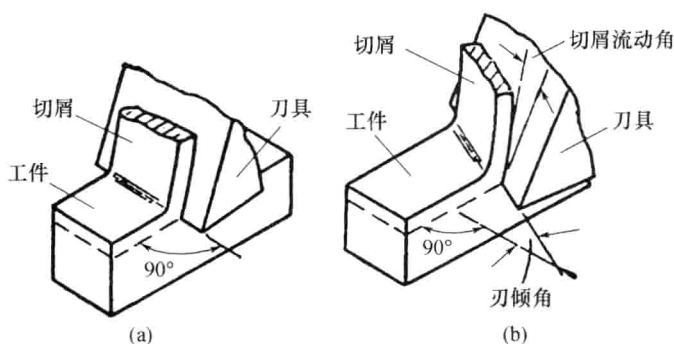


图2-1 直角切削和斜角切削
(a) 直角切削;(b) 斜角切削。

2.1 直角切削力学

直角切削是研究切削过程时最常见、最简单的切削方式,加工时刀刃与切削运动方向垂直,如图2-2所示。在直角切削中,假设切削过程中工件材料沿切削刃不变形,因此它属于二维的平面应变变形过程,不涉及材料的侧向伸展。因此,切削力只施加在切削速度方向和切削厚度方向,它们分别被称为切向力和进给力。

切屑流过的表面称为前刀面(或前面),对着工件新加工表面或已加工表面并磨有角度的刀具表面称为后刀面。切削时,刀具后刀面与工件新加工表面之

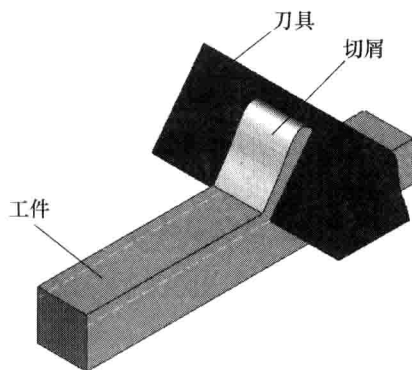


图 2-2 直角切削的几何关系

间有一个楔形的“间隙”。刀具切除的单个材料层的深度,称为切削厚度,如图 2-3 所示。在实际切削工作中,虽然这个尺寸常常随切削进程而变化,但为了简化研究工作,通常把它看作一个不变的数值。

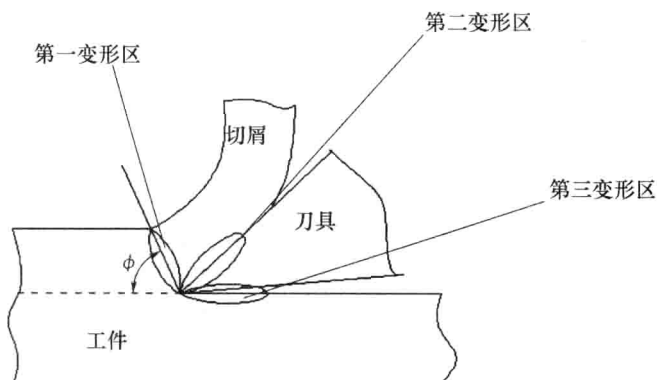


图 2-3 变形区的划分

刀具前刀面的倾斜度,是金属切削时最重要的变量之一。在直角切削时,这个倾斜度或角度,由前刀面和新加工表面的垂线之间的角度来表示,这个角度称为前角,或者称为工作法向前角。刀具的后刀面在切除切屑过程中不起切除切屑的作用。然而,刀具后刀面与工件新加工表面之间的角度会影响刀具的磨损速度。这个角度称为后角,或者更准确地称为工作法向后角。

金属切削过程中,切屑形成后,在切屑根部和前、后刀面处工件大致被划分为三个变形区,如图 2-3 所示。

(1) 第一变形区。该变形区金属的剪切滑移如图 2-4 所示,以切削层中某一点 P 为研究对象,当 P 点运动到 OA 线上的 1 点位置时,其所受的剪切应力达

到了材料的剪切屈服极限 τ_s , 则 P 点在向前运动的同时, 也沿 OA 线方向滑移, 其合成运动使 P 点由 1 点运动到 2 点。2' - 2 就是滑移量。 P 点向 2、3、4 点运动时, 同样存在滑移现象, 越逼近切削刃和前刀面, 滑移量越大。同时, P 点的运动方向也在悄然发生着变化, 当运动到 OM 线上的 4 点时。由于其运动方向与前刀面平行, 将停止沿 OM 线滑移, 变成切屑从前刀面流出。因此, 切屑的形成过程, 就其本质来说, 是被切削层金属在刀具切削刃和前刀面作用下, 因受挤压而产生剪切滑移变形的过程。

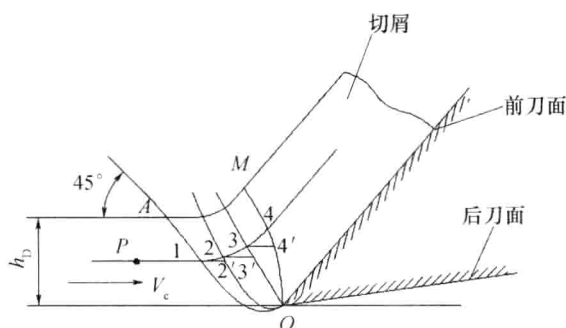


图 2-4 第一变形区金属的剪切滑移

第一变形区的宽度与切削速度有直接关系。切削速度越大, 第一变形区的宽度越窄, 在一般切削速度范围内, 其宽度仅为 $0.02 \sim 0.2\text{mm}$ 。因此, 第一变形区面可近似用一个平面来表示, 称为剪切面。剪切面和切削速度方向之间的夹角称为剪切角。剪切角的大小反映了切削变形程度的大小, 剪切角越大, 切削变形越小。

(2) 第二变形区。切削层金属经过第一变形区后形成切屑。在沿刀具前刀面流出时, 进一步受到前刀面强烈的挤压和摩擦, 使切屑底层的金属晶粒纤维进一步被拉长, 发生更为严重的塑性变形, 使切屑底层金属纤维化, 其方向基本上与前刀面平行, 这一变形区域称为第二变形区。在第二变形区内若产生切屑底层的堆积, 就形成了积屑瘤。由于积屑瘤可以代替切削刃进行切削, 所以, 第二变形区对切削过程会产生较显著的影响。

(3) 第三变形区。已加工表面的金属材料受到了刀具切削刃和刀具后刀面的挤压与摩擦, 造成更为严重的纤维化和加工硬化现象。在刀具后刀面离开后, 已加工表面的表层和深层金属都要产生回弹, 从而产生表面残余应力, 这一区域称为第三变形区。第三变形区内的摩擦与变形情况直接影响着已加工表面的质量。