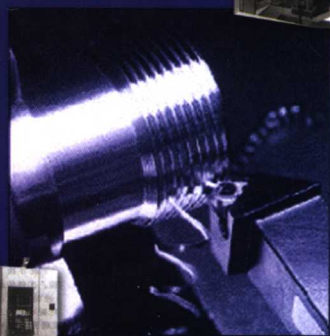


先进切削加工技术及应用

XIANJIN QIEXIAO JIAGONG JISHU JI YINGYONG

刘战强 黄传真 郭培全 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



先进切削加工技术及应用

刘战强 黄传真 郭培全 编著



机械工业出版社

本书首先回顾切削加工的历史发展、研究内容及应用现状,主要阐述先进制造技术中的先进切削加工技术,介绍切削加工的最新研究成果,包括(超)高速切削、硬切削、干切削、精密和超精密切削加工技术,从机床、刀具和加工工艺参数的制订等方面介绍这些先进切削加工技术的基础理论。为了推广应用先进切削加工技术,本书给出很多具体实例,以供参考。虚拟切削加工技术在产品研制开发中起越来越重要的作用,本书最后另辟一章,介绍虚拟切削理论、技术及应用。

本书可作为高等院校机械设计及其自动化专业本科生和研究生的教材,又可作为相关专业工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

先进切削加工技术及应用/刘战强等编著. —北京:机械工业出版社, 2005.6

ISBN 7-111-16764-3

I. 先... II. 刘... III. 金属切削-加工工艺 IV. TG506

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 066374 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:周国萍 责任编辑:舒雯 版式设计:张世琴

责任校对:李秋荣 封面设计:陈沛 责任印制:杨曦

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5·6.375 印张·244 千字

0 001—5 000 册

定价:19.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

切削加工是制造技术的主要基础工艺,是机械制造中最基本的加工方法之一。20世纪80年代以来,随着全球化市场竞争日益激烈,为取得竞争优势,世界各国普遍纷纷开展先进制造技术的研究,伴随着信息技术、微电子技术、材料科学等高新技术的发展,先进制造技术一方面发展了以数控机床为基础的加工自动化技术,另一方面发展了许多新的切削加工工艺和加工方法。

近年来,随着数控机床、控制系统等制造技术、刀具材料及其涂层技术和信息技术等高新技术的进一步发展,切削技术进入高效切削的新阶段,开创了高速、高精密、柔性、复合、环保的切削加工新技术,使切削加工的总体水平达到了一个新的高度,传统切削加工的面貌发生了根本的变化。高速切削、硬切削、干切削、精密和超精密切削及虚拟切削已成为现代切削技术的主要标志,也是先进制造技术的一个重要特征。

21世纪,中国将成为世界工厂,世界制造中心正在向中国转移,但是我国的切削加工水平与国外相比还有很大的差距,发展先进切削加工技术、建设制造强国的重任责无旁贷地落在切削技术研究人员和工作者的肩上。

本书的作者多年致力于切削加工技术及其应用的研究。本书是在总结这些研究工作的基础上,收集了大量国内外有关资料撰写而成,包括高速切削加工技术、干切削技术、硬切削技术、精密和超精密切削加工技术和虚拟切削技术等主要内容。本书从理论和技术上,着眼于最新的内容和动向,以期对切削加工技术的研究、发展和实际应用起到积极的促进作用。

参加本书编著的作者有刘战强教授(第1、2、3章)、黄传真教授(第4章)、郭培全教授(第5、6章)。刘战强教授负责全书统稿。

在本书的编写过程中,参阅并部分引用了国内外同行专家的研究成果及国内外部分刀具厂商的产品样本和应用实例,在此向他们致谢。

本书的宗旨是把先进的切削加工技术、经验与解决方案介绍给读者。但先进切削加工技术还在不断研究发展之中,限于作者水平有限,书中的缺点和错误在所难免,诚恳希望专家和读者批评指正。

作 者

2005年1月于济南

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 先进制造技术	1
1.2 切削加工技术的发展历史	2
1.3 切削加工的理论研究	4
1.4 切削加工的分类	6
1.5 先进切削加工技术	7
1.5.1 高速切削加工技术	8
1.5.2 干切削加工技术	9
1.5.3 硬切削加工技术	11
1.5.4 精密和超精密切削加工技术	11
1.5.5 虚拟切削技术	13
1.6 小结	14
参考文献	14
第2章 高速切削加工技术	16
2.1 高速切削加工的理论基础	16
2.1.1 切屑类型	16
2.1.2 切削力	17
2.1.3 切削热和切削温度	18
2.1.4 高速切削刀具的损坏形态与寿命	20
2.1.5 高速切削表面质量	21
2.2 高速切削加工的关键技术	22
2.2.1 高速切削技术体系	22
2.2.2 高速切削机床	23
2.2.3 高速切削刀具材料	25
2.2.4 高速切削刀柄技术	34
2.2.5 高速切削安全与监控技术	36
2.2.6 高速切削数据库技术	38
2.2.7 高速切削加工工艺与 NC 编程技术	38
2.3 高速切削应用	43

2.3.1 航空航天材料的高速切削	43
2.3.2 模具的高速切削	56
2.3.3 汽车工业中的高速切削	62
2.4 高速切削加工的经济性	69
2.5 小结	71
参考文献	71
第3章 干切削加工技术	75
3.1 切削液对切削过程及环境的影响	75
3.1.1 切削液的作用	75
3.1.2 切削液的危害	76
3.2 干切削工件材料与几何形状	77
3.3 干切削刀具技术	79
3.4 干切削机床	83
3.5 干切削工艺与应用	84
3.6 小结	90
参考文献	91
第4章 硬切削加工技术	92
4.1 硬切削的概念与特点	92
4.2 硬切削刀具	93
4.2.1 硬切削对刀具材料的要求	93
4.2.2 硬切削时的刀具材料及其选择	94
4.2.3 硬切削刀片结构及几何参数确定	95
4.3 硬切削工艺系统	95
4.4 硬切削的理论与试验研究	97
4.4.1 硬车削研究	97
4.4.2 硬铣削研究	101
4.4.3 高速硬切削的理论与试验研究	103
4.5 硬切削的应用	105
4.5.1 硬切削加工参数的选择	105
4.5.2 硬车削加工	105
4.5.3 硬镗削加工	107
4.6 小结	107
参考文献	108
第5章 精密和超精密切削加工技术	110

5.1 精密和超精密切削加工的概念与特点	110
5.1.1 精密和超精密切削加工的概念	110
5.1.2 精密和超精密切削加工的特点	111
5.2 精密和超精密切削加工的基础理论	112
5.2.1 切削变形和切削力	112
5.2.2 切削热和切削液	118
5.2.3 金刚石刀具的磨损、破损及耐用度	120
5.3 精密和超精密切削加工的关键技术	122
5.3.1 精密和超精密切削机床	122
5.3.2 精密和超精密切削刀具的设计与制造	125
5.3.3 精密和超精密切削加工的测量技术	130
5.3.4 精密和超精密切削加工误差补偿技术	130
5.4 精密和超精密切削的应用	132
5.4.1 SiC 晶须增强铝基复合材料的超精密切削	132
5.4.2 磁盘基片的精密切削	137
5.4.3 陶瓷的精密切削加工	140
5.4.4 光学元器件的精密切削	144
5.4.5 铜基粉末冶金的精密切削	146
5.5 小结	146
参考文献	147
 第 6 章 虚拟切削加工技术	150
6.1 虚拟切削加工环境	150
6.1.1 虚拟现实技术	150
6.1.2 虚拟切削加工系统中的机床建模技术	153
6.1.3 虚拟切削加工系统中工件的描述	156
6.1.4 虚拟刀具的描述及刀具运动扫描体的计算	163
6.2 虚拟切削加工仿真的实现	170
6.2.1 基于 OpenGL 的虚拟切削加工系统	170
6.2.2 虚拟切削加工系统中 NC 代码的处理	176
6.2.3 虚拟切削加工系统中的切削力模型	179
6.3 虚拟切削加工系统实例	185
6.3.1 虚拟车削加工系统	185
6.3.2 分度凸轮虚拟切削加工系统	187
6.4 小结	192
参考文献	193

第1章 绪 论

制造业是一切生产和装配制成品的企业群体的总称，是工业的主体，而制造技术是将原材料和其他生产要素经济合理地转化为可直接使用的具有较高附加价值的成品（或半成品）及技术服务的技術群。制造技术的发展是由社会、政治、经济等多方面因素决定的，其中最主要的因素是技术推动以及市场牵引。随着社会需求个性化、多样化的发展，生产规模由少品种大批量向多品种变批量方向发展，先进制造技术也随之产生。

1.1 先进制造技术

先进制造技术是传统制造业不断地吸收机械、信息、电子、材料、能源及现代管理等方面的最新技术成果，并将其综合应用于产品开发与设计、制造、检测、管理及售后服务的制造全过程，实现优质、高效、低耗、清洁、敏捷制造，并取得理想技术经济效果的前沿制造技术的总称。从本质上看，可以说先进制造技术是在传统制造技术发展的基础上，不断吸收信息技术、自动化技术与现代管理技术的结果发展而成的。

先进制造技术是一个大制造的概念，不仅涉及到具体生产制造过程，而且涉及产品生命周期的所有过程。它涵盖了市场分析、产品设计、工艺规划、制造装配、监控检测、质量保证、生产管理、售后服务等整个生产过程。应用先进制造技术的功能目标是涉及多方面的，可概括为 TQCSE，其中 T 表示时间 (Time)，Q 表示质量 (Quality)，C 表示成本 (Cost)，S 表示服务 (Service)，E 表示环境友善性 (Environment)。其主要内容可归结如下四部分：

1. 现代设计理论和方法 市场竞争对产品设计的的要求是要面向市场、面向用户的。并行工程设计方法以及由此派生出的一系列新的设计理念，如面向制造、面向装配、面向检测、面向环境的绿色设计等，使设计与制造系统的全过程相结合，涵盖了从产品概念设计到产品报废处理的整个生命周期中的所有因素，包括质量、成本、进度计划和用户需求，并通过计算机信息化制造手段、快速制造、虚拟制造技术等在设计初期对产品的结构、工艺进行优化，对产品的性能进行预测。

2. 先进的加工技术 产品的加工制造是先进制造技术的基础，是实现快速、灵活地生产出创新产品的主体。进入 20 世纪 90 年代以来，制造过程和加工工艺

的精密化、高速化、自动化、信息化得到了发展,如精密成形或净成形技术,激光、离子束、高压水射流、电化学及电火花等特种加工技术,快速原型制造技术等。

3. 先进的制造自动化技术 柔性快速制造系统(FMS)、数控(NC)技术、机器人技术、计算机集成制造技术、制造过程的计划和调度技术、人机一体化制造系统、虚拟制造等得到广泛应用。制造自动化技术的发展趋势可用“六化”简要描述,即制造全球化、制造敏捷化、制造网络化、制造虚拟化、制造智能化和制造绿色化。

4. 先进的生产管理模式 为了快速响应市场,向客户提供低成本、小批量、个性化、高质量产品,基于先进制造自动化技术的及时生产(Just in time)、并行工程(Concurrent engineering)、精良生产(Lean production)、敏捷制造(Agile manufacturing)等现代制造模式成为现代企业管理发展的方向。以制造资源计划(Manufacturing Resource Planning, MRP II)/企业资源计划(Enterprise Resources Planning, ERP)为代表的,以信息技术为基础的,包含先进管理理论和方法的,进行企业资源计划与控制的高度集成的管理信息系统成为对企业影响深远的战略工具。对制造全过程进行质量管理,把形成产品质量的设计试制过程、制造过程、辅助生产过程、使用过程都管起来的全面质量管理(Total Quality Management, TQM)广泛被企业采用。

切削加工是用切削工具,把坯料或工件上多余的材料层切去,使工件获得规定的几何形状、尺寸和表面质量的加工方法。任何切削加工都必须具备三个基本条件:切削工具、工件和切削运动。切削是制造加工技术中应用最广泛的基础技术之一,其工艺过程、工艺参数等决定了制造技术的固有技术水平和效率。

现代产业和工程领域都需要应用机械,即使是在人们的日常生活中,也越来越多地使用各种含有机械结构的用品,如汽车、自行车、钟表、照相机、洗衣机、冰箱、空调机、吸尘器等。其中的机械结构几乎没有不经过切削加工的,即使没有直接经过切削加工,但其生产过程中所使用的模具、夹具等仍少不了切削加工。因此,只有大力发展与应用优质、高效、低耗、清洁、灵活的先进切削加工技术,改变切削加工技术的落后状态,才能从根本上提高制造技术水平,满足人民日益增长的需要。

1.2 切削加工技术的发展历史

作为机械加工的一种重要方法,切削加工具有相当悠久的历史,而且可以预见,切削加工作为一种机械加工方法,在未来很长时间内都是不可替代的。

切削加工技术的历史可追溯到原始人创造石劈、骨钻等劳动工具的旧石器时期。古代加工石质、木质、骨质和其他非金属器物是今天金属加工的雏形。在旧石器时代就有石制的砍砸器具，到了新石器时代，人们在与大自然的搏斗中，生产工具得到了不断的改进，如石斧、石刀、石镰等，并且能在石器上钻孔，甚至把坚硬的石刃镶嵌或粘接在骨把上制成夹固式石刃骨刀。人类从这时候起，在生产实践中逐步认识了刀具的作用。可以这样说，一个原始的切削加工过程形成了，它具备了切削的基本条件：刀具（带刃口的石器），被加工对象（生产和生活用品），切削运动。我国在金属切削方面有着悠久的历史，早在商代中期（公元前 13 世纪），就已能用研磨的方法加工铜镜；商代晚期（公元前 12 世纪），曾用青铜钻头在卜骨上钻孔；西汉时期（公元前 206 ~ 公元 23 年），就已使用杆钻和管钻，用加砂研磨的方法在“金缕玉衣”的 4000 多块坚硬的玉片上，钻了 18000 多个直径 1 ~ 2mm 的孔。

17 世纪中叶，我国开始利用畜力代替人力驱动刀具进行切削加工。如公元 1668 年，曾在畜力驱动的装置上，用多齿刀具铣削天文仪上直径达 2 丈（古丈）的大铜环，然后再用磨石进行精加工。18 世纪后半期，英国工业革命开始后，由于蒸汽机和近代机床的发明，切削加工开始用蒸汽机作为动力；到 19 世纪 70 年代，切削加工中开始使用电力作为动力。

刀具是机械制造中用于切削加工的工具，刀具的发展在人类进步的历史上占有重要的地位。我国早在公元前 28 ~ 公元前 20 世纪，就已出现黄铜锥和纯铜的锥、钻等刀具。战国后期（公元前 3 世纪），制成了铜质刀具。当时的钻头和锯与现代的扁钻和锯已有些相似之处。然而，刀具的快速发展是在 18 世纪后期，伴随蒸汽机等机器的发展而来的。1783 年，法国的勒内首先制出了铣刀。1792 年，英国的莫兹利制出了丝锥和板牙。有关麻花钻的发明最早的文献记载是在 1822 年，但直到 1864 年才作为商品生产。那时的刀具是用高碳工具钢制造的整体式刀具，允许使用的切削速度约为 5m/min。1868 年，英国的穆舍特制成含钨的合金工具钢。此后各种新的刀具材料相继出现。1898 年美国的泰勒和怀特发明的高速钢，使刀具许用的切削速度比碳素工具钢和合金工具钢刀具提高两倍以上，达到 25m/min 左右。1923 年德国的施勒特尔发明的硬质合金刀具，其切削速度比高速钢刀具又提高两倍以上。

由于当时高速钢和硬质合金的价格比较昂贵，刀具出现了焊接和机械夹固式结构。1938 年，德国德古萨公司取得关于陶瓷刀具的专利。1949 ~ 1950 年间，美国开始在车刀上采用可转位刀片，不久即应用在铣刀和其他刀具上。

1969 年，瑞典山特维克钢厂取得用化学气相沉积法生产碳化钛涂层硬质合金刀片的专利。1972 年，美国的邦沙和拉古兰发展了物理气相沉积法，在硬质合金或高速钢刀具表面涂覆碳化钛或氮化钛硬质层。表面涂层方法把基体材料

的高强度和韧性，与表层的高硬度和耐磨性结合起来，从而使这种复合材料具有更好的切削性能。同年，美国通用电气公司生产了聚晶人造金刚石和聚晶立方氮化硼刀片。这些非金属刀具材料可使刀具以更高的速度切削。

国际生产工程学会（CIRP）的研究报告指出，由于刀具材料的改进，切削加工所允许的切削速度每隔十年几乎提高一倍。实践证明，每一种新刀具材料的出现，都使切削加工的能力和水平前进一大步。由此可见，切削加工的历史就是刀具材料发展的历史。

1.3 切削加工的理论研究

对切削理论的研究可以追溯到 17 世纪，1679 年 Hooke 出版了《论刀具切削》一书，这本书中还包括了 Hooke 的两个重要的科学发现，一是提出了以其名字命名的定理，这就是著名的应力与应变成正比的弹性定理；另一个发现是 Hooke 直觉地理解到振动着的弹簧与一个单摆是动力等价的。但真正作为一门学科来研究，切削理论研究大致从 1850 年算起，至今已有 150 多年的历史。

回顾 150 多年的切削理论研究历史，根据研究重点的不同，可以分为以下三个阶段：

第一研究阶段可称为力学或切屑形成机理时期（Mechanics or Chip Formation Period），大致从 1850 年至 1900 年。1774 年，J. Wilkinson 发明了第一台金属镗床，提高了气缸的加工精度，减少了气缸和活塞间的蒸汽泄漏，从而使得 J. Watt 的蒸汽机的应用成为可能。从这一典型事例中可以知道，金属切削加工在当时社会生产中具有非常重要的地位，是当时最先进的加工方法。

这一阶段的初期，切削理论主要研究方向是研究切削过程中的切削力和消耗的切削能量，主要的研究者有 H. Cocquihat、Wiebe 和 Joessel。H. Cocquihat 研究了在铸铁、黄铜和石头等材料上钻孔时，切去一定体积材料所需要的功。Joessel 主要研究刀具几何角度对切削力的影响。

在这一阶段的后半段，主要的研究方向是塑性剪切和切屑形成机理。Timme 在 1870 年提出切屑是经过剪切面的剪切变形而形成的。Tresca 于 1864 至 1872 年间在一系列金属挤压实验基础上提出了最大切应力屈服准则，可以认为是塑性本构关系实验与理论研究的开始。1873 年至 1878 年间 Tresca 又提出切屑的形成是工件材料受刀具挤压，从而在垂直切削方向的平面发生剪切变形的过程。

这一阶段也开始了切削模型的研究。在 1881 年，Mallock 提出了类似于卡片模型的理论，而 Zvorkin 则在 1893 年建立了剪切角关系式，他假设剪切面是切应力最大面。值得注意的还有塑性力学 Durcker 公设的提出者 Durcker 等力学家的工作。

在这一阶段切削理论的研究和力学的研究有着紧密的关系,金属切削过程中所遇到的问题既给力学家们提供了新的课题,也为他们提供了验证其力学理论可靠而又简便的试验手段。在当时,力学起着先导和基础的作用,处于自然科学的前沿地位,所以金属切削理论的研究起点是很高的,也是处于当时自然科学的前沿地位。这也跟金属切削加工在当时社会生产中的地位相适应。

第二研究阶段可称为可切削加工性时期 (Machinability Period),大致从 1900 年至 1930 年约 30 年时间。在这一阶段,随着社会生产力的发展,金属切削加工技术也有了长足的进步,新的刀具材料和加工工艺不断出现。例如,1898 年 Taylor 和 White 发明了高速钢,1923 年德国的施勒特尔发明了硬质合金。

新的刀具材料的出现使切削加工的生产效率大大提高,应用范围越来越广。以高速钢的应用为例,Trent 在他的名著《Metal Cutting》中写到“高速钢刀具的出现引起了金属切削实践的革命,大大提高了机械加工车间的生产率,并要求完全改变机床的结构,据估计,在最初几年,美国的工程制造业,由于使用了价值二千万美元的高速钢而增加了八十亿美元的产值。”

与此同时,生产实际也给金属切削研究者带来了许多急需解决的问题,例如刀具寿命、工件表面质量、切屑的排除等等。1907 年 Taylor 在工作了整整 26 年,切除了 3 万 t 切屑,掌握了 10 万个以上的实验数据的基础上,在他经典的论文“On the Art of Cutting Metal”中提出了著名的刀具寿命公式,第一个研究了切削速度和刀具寿命之间的关系。这一公式对今天预测刀具寿命仍有重要的指导意义。有些学者认为金属切削理论的研究是从 Taylor 开始,虽不确切,但 Taylor 的工作确实是金属切削理论史上一个重要的里程碑。

可切削加工性 (Machinability) 这一概念是 20 世纪 20 年代中期首先由 Herbert、Rosenhain 和 Sturney 提出,在这一时期切削加工性主要是指切削速度与刀具耐用度之间的关系,而对切削表面质量、切屑去除和尺寸精度等的研究还不深入。切削加工性被看作是与材料的硬度、韧性等有关的材料的一个重要特性。在这一时期还开始关注刀-屑温度的重要性,并进行了初步的研究。

第三研究阶段从 20 世纪 30 年代至今,可以称之为理论推广应用时期 (Amplification and Application Period),传统意义上的金属切削理论研究在 20 世纪 60、70 年代达到高峰。在这一阶段总结了上两个阶段的研究成果,将切屑成形机理与可切削加工性的关系的研究发展到了一个新的高度,而在实验手段和理论应用于生产方面也达到了前所未有的水平。这一阶段比较重要的工作有: Bisacres 和 Chao 在 20 世纪 40 年代中期首先研究了切削过程中的切削温度分布,提出了温度参数的概念。以后还有 Trigger、Lowen 等人的工作。

在正交切削模型的研究方面, Pisspen、Merchant、Lee 和 Shaffer、Shaw 以及 Oxley 等都做了重要的开创性工作。日本的工藤英明、白井英治利用视塑性方法

构造滑移线场,从而建立切削方程式的新方法也值得加以重视。我国的金属切削理论研究者也做出了重要的贡献。

这一阶段研究重点是切削过程中出现的各种现象及其发生机理的研究,例如剪切角关系、切削温度分布和刀具磨损、切屑卷曲机理以及积屑瘤形成机理等等。在这一阶段还出现了英国金属学家 Trent 的《Metal Cutting》、美国金属切削理论家 Shaw 的《Metal Cutting Principles》等全面总结性介绍金属切削理论和实验技术的经典著作。

金属切削机理的研究可以说是在 20 世纪 60、70 年代到 80 年代初期达到高峰期,新理论、新方法不断涌现,计算机技术的飞速发展及其广泛应用使得金属切削机理的研究有了新的强有力的工具。20 世纪 80 年代以后随着自动控制在金属切削生产中的广泛应用,金属切削加工的研究重点逐步转向切削加工与计算机技术和自动控制技术相结合的方面,对金属切削过程本身现象发生机理的研究相对较少。但为了更好地应用计算机技术、自动控制技术于金属切削加工的生产实际中,还是应该重视金属切削基础理论的研究。随着生产力的进一步发展,新材料、新工艺的不断涌现,以及计算机技术和自动控制技术在金属切削加工中更为广泛深入的应用,必将为金属切削基础理论的研究开拓新的方向、提出新的要求。

切削理论作为切削加工技术的理论基础,始终是与生产实际结合在一起的。它既是生产实践活动的客观总结,又对生产实践起着重要的指导作用。这正是切削理论之所以能够得到长期不断发展的根本原因。切削理论的发展应紧密联系生产实际,研究解决不断涌现的新材料的切削加工机理和新的先进加工工艺,以及切削加工向精密化、自动化和智能化发展过程中所碰到的各种问题。

1.4 切削加工的分类

材料的切削加工有许多分类方法,常见的有按工艺特征、按材料切除率和加工精度、按表面成形方法三种分类方法。

切削加工的工艺特征决定于切削工具的结构,以及切削工具与工件的相对运动形式。因此按工艺特征,切削加工一般可分为:车削、铣削、钻削、镗削、铰削、刨削、插削、拉削、锯切、磨削、研磨、珩磨、抛光、齿轮加工、蜗轮加工、螺纹加工、钳工和刮削等。

按材料切除率和加工精度,切削加工可分为粗加工、半精加工、精加工、精整加工、修饰加工、超精密加工等。

粗加工是用大的背吃刀量,经一次或少数几次走刀,从工件上切去大部分

或全部加工余量的加工方法，如粗车、粗刨、粗铣、钻削和锯切等，粗加工效率高但精度较低，一般用作预先加工；半精加工一般作为粗加工与精加工之间的中间工序；精加工是用精细切削的方式，使加工表面达到较高的精度和表面质量，如精车、精刨、精铰、精磨等，精加工一般是最终加工。

精整加工是在精加工后进行，其目的是为了获得更小的表面粗糙度，并稍微提高精度。精整加工的加工余量小，如珩磨、研磨、超精磨削和超精加工等；修饰加工的目的是为了减小表面粗糙度，以提高防蚀、防尘性能和改善外观，而并不要求提高精度，如抛光、砂光等；超精密加工主要用于航天、激光、电子、核能等需要某些特别精密零件的加工，其精度高达 IT4 以上，如镜面车削、镜面磨削、软磨粒机械化学抛光等。

切削加工时，工件的已加工表面是依靠切削工具和工件作相对运动来获得的。按表面形成方法，切削加工可分为刀尖轨迹法、成形刀具法、展成法三类。

刀尖轨迹法是依靠刀尖相对于工件表面的运动轨迹，来获得工件所要求的表面几何形状，如车削外圆、刨削平面、磨削外圆、用靠模车削成形面等，刀尖的运动轨迹取决于机床所提供的切削工具与工件的相对运动。

成形刀具法简称成形法，是用与工件的最终表面轮廓相匹配的成形刀具，或成形砂轮等加工出成形面，如成形车削、成形铣削和成形磨削等，由于成形刀具的制造比较困难，因此一般只用于加工短的成形面。

有些切削加工兼有刀尖轨迹法和成形刀具法的特点，如螺纹车削。

展成法又称滚切法，是加工时切削工具与工件作相对展成运动，刀具和工件的瞬心线相互作用纯滚动，两者之间保持确定的速比关系，所获得加工表面就是刀刃在这种运动中的包络面，齿轮加工中的滚齿、插齿、剃齿、珩齿和磨齿等均属展成法加工。

1.5 先进切削加工技术

随着科学技术的发展，对切削加工提出了越来越高的要求，这些要求归纳起来主要有两点，首先是要满足越来越高的加工效率、加工精度和表面质量（表面粗糙度、加工硬化、残余应力、表面纹理等）要求；其次是经济性要求和生态性要求（即绿色生产要求）。为了满足这些要求，人们已经做了大量的工作，并取得了良好的经济效益和社会效益。这些工作主要体现在先进切削加工技术的发展上。

本书主要对以下能够代表制造技术发展水平的先进切削加工技术进行介绍。

1.5.1 高速切削加工技术

高速切削加工技术是近 20 多年迅速崛起的一项先进制造技术, 已成为切削加工技术发展的主流。通常认为采用的切削速度和进给速度比常规加工高 5 ~ 10 倍的加工方式就是高速加工, 但它并非普通意义上的采用大的切削用量来提高加工效率的一种加工方式, 而是采用高转速、快进给、小背吃刀量和小进给量来去除余量, 完成零件加工的过程。

与常规切削加工相比, 高速切削加工具有以下优越性: ①单位时间内的材料切除率可增加 3 ~ 6 倍或更高, 缩短零件的切削加工工时, 提高生产效率; ②切削力降低, 背向力小, 有利于加工薄壁、细长等刚性差的零件; ③大量的切削热被切屑带走, 工件保持冷态, 适合于加工易热变形的工件; ④激振频率高, 工作平稳, 振动小, 可加工非常精密、光洁的零件, 表面残余应力小, 可省去切削后的精加工工序。因此, 高速切削加工不仅可获得极高的生产效率, 而且可以显著提高工件的加工精度和表面质量。

高速切削加工技术主要用于加工钢、铸铁及其合金、铝、镁合金、超级合金(镍基、铬基、铁基和钛基合金)及碳纤维增强塑料等复合材料, 其中加工铸铁和铝合金最为普遍。

1) 高速切削有色金属, 如铝、铝合金, 特别是铝的薄壁加工。目前已经可以加工出厚度为 0.1mm、高为几十毫米的成形曲面。

2) 石墨的高速切削加工。在模具的型腔制造中, 由于采用电火花腐蚀加工, 因而石墨电极被广泛使用。但石墨很脆, 因此必须采用高速切削才能较好地进行成形加工。

3) 模具的高速切削加工, 特别是淬硬模具的加工。采用高速切削加工淬硬材料不仅可达到很高的表面质量 ($R_a \leq 0.4\mu\text{m}$), 还可省去电加工后的磨削和抛光工序。

4) 难切削材料的高速切削加工, 如耐热不锈钢、镍基合金等。

高速切削加工是一个复杂的系统工程, 涉及机床、刀具、工件、加工工艺过程参数及切削机理等诸多方面。高速切削包括高速硬切削、高速干切削、高进给速度切削和高切除率切削。高速切削技术的推广应用将大幅度提高生产效率和加工质量, 并降低成本。掌握正确的高速切削工艺是成功实现高速加工的关键。高速切削的工艺技术包括切削方法和切削参数的选择优化, 对各种不同材料的切削方法、刀具材料和刀具几何参数的选择等。目前, 高速切削加工技术已在国内外汽车、飞机、模具、轻工和信息等产业部门得到了非常广泛的应用(见图 1-1), 并取得了巨大的技术与经济效益。高速切削加工技术为机械制造企业快速响应市场信息提供了强有力的支持, 其发展与应用是现代制造业发

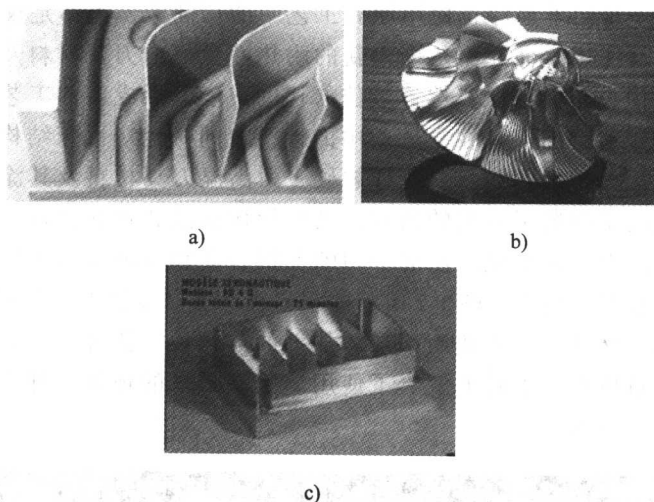


图 1-1 高速切削加工技术的应用

a) 石墨电极 b) 汽轮机叶片 c) 薄壁铜电极

展的必然趋势。

关于高速切削加工技术的详细内容参见本书第 2 章。

1.5.2 干切削加工技术

干切削是指在加工过程中不用切削液的一种加工工艺，是目前在机械加工中为保护环境和降低成本而有意识地减少或完全停止使用切削液的切削加工方法。机械制造企业逐步取消和减少切削液，选用干切削加工，主要是积于经济和环境两方面的考虑：

1) 切削液的大量使用造成了零件生产成本的大幅度提高。据德国许多公司的统计资料表明，使用切削液的费用占总制造成本的 16%，而切削刀具消耗的费用仅占制造成本的 3% ~ 4%。

2) 严重污染环境。长期暴露在空气中的切削液，尤其是雾状切削液对操作者的健康造成损害，同时还会造成工作场地、局部地区的土地、水源和空气污染，破坏生态环境。

干切削技术起源于欧洲，目前在西欧各国最为盛行。据统计，2003 年德国 20% 以上制造业采用干切削技术。干切削技术在车削和铣削上的应用已日益广泛，在钻削、拉削、螺纹加工和齿轮加工方面也有重大突破。干切削技术在加工有色金属（如铝、铜等及其合金）及铸铁等方面已比较成熟，但在钢材尤其是高强度钢材方面问题较多，刀具磨损严重，使用寿命低，对刀具的材料和结构要求较高。

干切削并不是简单地停止使用原有工艺中的切削液，也不是仅靠降低切削参数来保证刀具使用寿命，而是采用新的耐热性更好的刀具材料及涂层，设计合理的刀具结构与几何参数；选择最佳的切削速度，形成新的工艺条件。干切削的难点在于如何提高刀具在干切削中的性能，同时也对机床结构、工件材料及工艺过程等提出了新的要求。各种超硬、耐高温刀具材料及其涂层技术的发展，为干切削技术创造了有利的条件。最小量切削液装置的有效应用和小孔的各种孔加工标准刀具的出现，使准干切削在铝合金和各种难加工材料的孔加工中获得了越来越多的应用。图 1-2 所示为空中客车公司在加工大型铝合金件时采用了最小量切削液法，只要使用不加添加剂的雾化油，就可以完成整个零件加工，同时用量极小，很好地解决了使用切削液带来的环保、健康、切屑处理等问题，降低了成本。

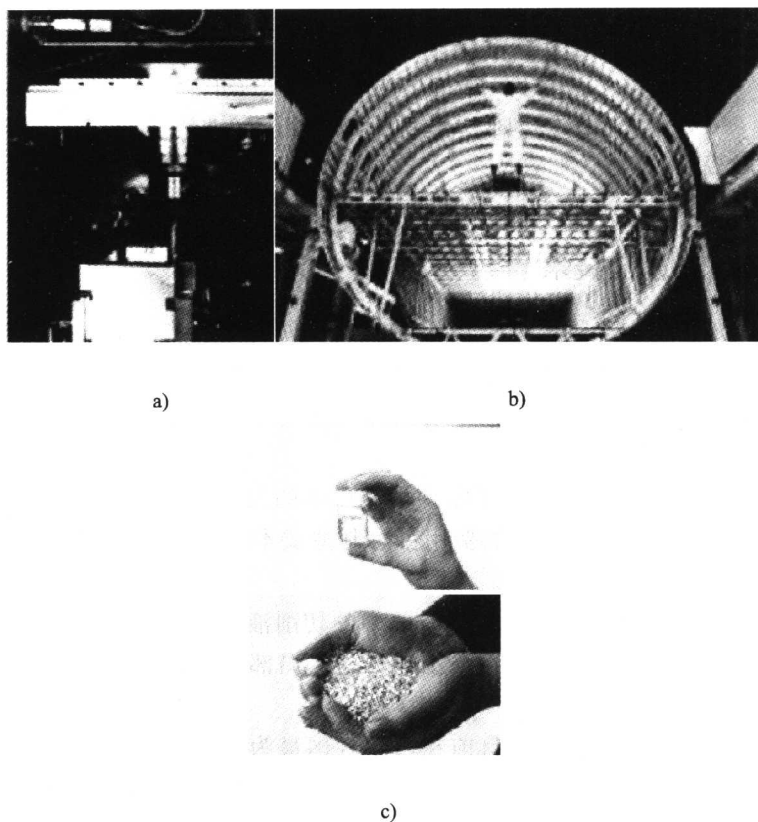


图 1-2 干切削与最小量切削液 (MQL) 加工的应用

a) 干切削 b) 干切削加工的空中客车铝合金结构件 c) 使用 MQL 后的切屑

干切削加工是对传统生产方式的一个重大创新，是一种崭新的清洁制造技