



教育部高职高专规划教材

金属切削原理与机床

JINSHU QIEXIAO YUANLI YU JICHUANG

第二版

胡黄卿 主编



化学工业出版社

教育部高职高专规划教材

金属切削原理与机床

JINSHU QIEXIAO YUANLI YU JICHUANG

第二版

胡黄卿 主 编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书为《金属切削原理与机床》第二版,是根据金属切削原理与机床课程的基本要求和教材编写大纲,遵循“拓宽基础,强化能力,立足应用,激发创新”的原则对本书第一版进行修订而成的。

本书的主要内容包括金属切削原理、金属切削机床和金属切削刀具三大部分。重点介绍切削过程基本规律及其应用;车床、磨床和铣床能完成的主要工作、组成、结构特征、传动系统分析和车刀、砂轮、铣刀的种类、构造、几何参数及其选用、切削力的计算方法等。并简要介绍滚齿机、钻床、镗床、插床、拉床、刨床等能完成的主要工作和基本构造,钻头、铰刀、镗刀、复合孔加工刀具、拉刀和滚刀等刀具的组成、种类、加工方式和切削用量的确定等。

本书遵循专业理论为专业技能服务的基本原则和注重对学生专业能力、解决问题的能力的培养,以满足学生服务生产第一线的需要。

本教材集金属切削原理、金属切削机床和金属切削刀具为一体,适用于高职高专机械工程类(机械设计、机械加工、机械维修与保养)专业,近机械类及高等工程专科学校(包括本科少学时、成人高校及重点中等专业学校),职工大学,从事机械行业的职员职业培训时开设金属切削原理、金属切削机床和金属切削刀具综合课程的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

金属切削原理与机床/胡黄卿主编. —2版. —北京:
化学工业出版社, 2009.5

教育部高职高专规划教材

ISBN 978-7-122-04847-9

I. 金… II. 胡… III. ①金属切削-高等学校:技术
学院-教材②机床-高等学校:技术学院-教材 IV. TG5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 022426 号

责任编辑:高钰

文字编辑:张绪瑞

责任校对:徐贞珍

装帧设计:史利平

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张18¼ 字数489千字 2009年6月北京第2版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:30.00元

版权所有 违者必究

第二版前言

本教材第一版于2004年6月出版发行,在几年的使用过程中,得到了众多读者的认可,同时收到了许多读者提出的宝贵意见。为使教材更加适合广大使用者的需要,特对本教材第一版进行了修订,并在此特别感谢为本书提出宝贵修订意见的读者。这次修订主要做了以下几方面的工作。

(1) 删除了与实验重复的内容,如切削温度的测量;因生产实际中切削力常常是用仪器测量而获取的,因此删除了理论研究用的指数法计算切削力的例题。

(2) 增加了生产实际中必须掌握的内容,如硬质合金牌号的表示方法、硬质合金材料的牌号、性能及其应用;加工表面质量的范畴、磨削加工影响表面质量的因素、磨削加工时表面层材料金相组织变化和避免磨削烧伤的措施,切削液的维护与保管知识。

(3) 增加了新技术方面的知识,如在改善材料的切削加工性能中,对一些先进的加工切削技术进行了简介;增加了陶瓷刀具的分类和性能特点、陶瓷刀具适用加工的材质。

(4) 对第一版教材中一些编写得太简单但学生难以掌握的内容进行了补充,如可转位车刀片十个代号表示的特征意义内容,对砂轮组成要素、代号、性能和适用范围,砂轮的选择和砂轮的维护与保养等知识进行了详细的补充。

在修订过程中始终围绕“必需、够用”的原则,力求使教材与生产实际紧密结合,专业理论为专业技能服务,注重对学生专业能力和解决生产实际问题能力的培养,使学生获得的知识满足生产第一线的需要。

本教材可作为中等专业学校、职工大学、成人教育和从事机械行业的职员职业培训的试用教材以及工程技术人员的参考书。

由于编者水平有限,疏漏和不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

2009年2月

第一版前言

本书是高职机械工程类（机械设计、机械加工、机械维修与保养）专业的全国统编教材。也可作为中等专业学校、职工大学、成人教育的试用教材以及工厂技术人员的参考书。

本教材的特点是通俗易懂，文字简练，图文并茂。主要突出金属切削过程中切削力、热及温度的变化，刀具的磨损，刀具材料与合理几何参数的选择和切削用量的制订，切削液的选择以及机床的加工范围、组成、结构特征和传动系统分析等实用知识，并注重各个知识面的有机结合。

本书力求保持教材和生产实际相结合、专业理论为专业技能服务的基本原则，注重对学生专业能力和解决生产实际问题能力的培养，使学生获得的知识能满足生产第一线的需要。

全书绪论、第二章、第四章、第六章、第七章、第八章、第九章、第十二章由胡黄卿编写；第一章、第十章和第三章第一节、第二节由阎林洲编写；第五章、第十一章和第三章第五节由陈金霞编写；第三章第三节由黄坚编写、第四节由周勇编写。全书由胡黄卿统稿和定稿。

在编写过程中，袁广主审对整个初稿提出了宝贵和详细的修改意见，并得到了有关院校领导和老师的大力支持和帮助，谨此一并表示衷心感谢。

由于编者水平所限和编写时间仓促，书中错误和不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者

2004年4月

目 录

绪论	1	四、立方氮化硼 (CBN) 涂层	39
一、本课程的性质和任务	1	第五节 陶瓷	39
二、金属切削原理理论的发展	2	一、刀具用陶瓷的分类	40
三、切削加工技术发展	5	二、陶瓷刀具的切削性能	41
四、金属切削机床的发展概况	8	三、陶瓷刀具适用于加工的材质	41
第一章 刀具的几何角度及切削要素	10	第六节 超硬刀具材料	42
第一节 切削运动与工件的加工表面	10	一、金刚石	42
一、切削运动	10	二、立方氮化硼	44
二、工件上的加工表面	10	思考题与练习题	45
三、切削用量	10	第三章 金属切削过程的基本理论	47
第二节 刀具的几何参数	11	第一节 金属切削层的变形	47
一、刀具的分类	11	一、金属切削层的变形和切屑	47
二、刀具的构成	12	二、变形程度的表示方法	49
三、刀具的切削部分	12	三、影响前刀面摩擦因数的主要因素	50
四、刀具切削部分几何形状和角度	13	第二节 切屑的种类和积屑瘤的形成	51
第三节 刀具工作参考系及工作角度	14	一、切屑的种类	51
一、刀具的工作参考系	14	二、积屑瘤的形成及其对切削过程的	
二、刀具的工作角度	15	影响	52
三、进给运动对刀具角度的影响	15	第三节 切削力	55
四、刀尖安装高度对工作角度的影响	16	一、切削力的来源、切削合力及分力、	
五、切削层参数与切削方式	16	切削功率	55
思考题与练习题	18	二、影响切削力的因素	57
第二章 刀具材料	20	第四节 切削热与切削温度	59
第一节 刀具材料应具备的性能和刀具		一、切削热的产生和传出	59
材料的类型	20	二、影响切削热传导的主要因素	60
一、刀具材料应具备的性能	20	三、影响切削温度的主要因素	61
二、刀具材料类型和刀体材料	21	第五节 刀具磨损和耐用度	63
第二节 高速钢	22	一、刀具磨损的形态	63
一、通用型高速钢	22	二、刀具磨损的原因	64
二、高性能高速钢	23	三、刀具磨损过程及磨钝标准	65
三、粉末冶金高速钢	25	四、刀具耐用度及其经验公式	66
第三节 硬质合金	26	五、刀具的破损	69
一、硬质合金的组成	27	思考题与练习题	72
二、硬质合金的种类及硬质合金牌号		第四章 工件材料的切削加工性	73
表示方法	28	第一节 衡量切削加工性的指标	73
三、硬质合金的性能	30	一、以刀具寿命 T 或一定寿命下的切削	
四、新型硬质合金	32	速度 v_T 衡量加工性	73
第四节 涂层刀具	35	二、以切削力或切削温度衡量切削加	
一、涂层高速钢	37	工性	74
二、涂层硬质合金	38	三、以已加工表面质量衡量切削	
三、金刚石涂层	39	加工性	74

四、以切屑控制或断屑的难易衡量切削加工性	74	一、加工硬化产生的原因	109
第二节 工件材料切削加工性的影响		二、影响加工硬化的因素	109
因素	74	第四节 残余应力	112
一、金属材料物理力学性能的影响	74	一、残余应力产生的原因	112
二、金属材料化学成分的影响	75	二、影响残余应力的因素	113
三、金属材料热处理状态和金相组织的影响	76	思考题与练习题	114
四、切削条件对切削加工性的影响	77	第七章 切削用量和刀具几何参数的选择	115
第三节 改善切削加工性的途径	78	第一节 切削用量的制订原则	115
一、采用热处理改善材料切削加工性	78	一、切削用量同加工生产率的关系	115
二、调整材料的化学成分	78	二、切削用量的选择原则	116
三、合理选择刀具材料	79	第二节 刀具几何参数的选择	117
四、采用先进的切削技术	79	一、刀具合理几何参数的基本内容	118
思考题与练习题	81	二、选择刀具合理几何参数的一般性原则	121
第五章 切削液	82	三、前角、后角和主、副偏角的功用及其选择	121
第一节 切削液的作用、要求和添加剂	82	思考题与练习题	129
一、切削液的作用	82	第八章 金属切削机床的基本知识	130
二、切削液的添加剂	83	一、机床的分类和型号编制	130
第二节 切削液的分类及特性	83	二、工件的加工表面及其形成方法	131
一、油基切削液的类型及特性	84	三、机床传动原理及传动系统分析	132
二、水基切削液的类型及特性	85	思考题与练习题	138
三、膏状及固体润滑剂	87	第九章 车床	140
四、气体冷却剂	87	第一节 卧式车床	140
第三节 切削液的选择	87	第二节 卧式车床的传动系统	142
一、根据刀具材料选择切削液	87	一、主运动传动链	142
二、根据工件材料选择切削液	88	二、进给传动链	144
三、根据加工方法选择切削液	88	第三节 CA6140 型车床的主要结构	
第四节 切削液的维护与管理	93	部件	149
一、油基切削液的维护与管理	93	一、主轴箱	149
二、乳化液的维护与管理	94	二、变速机构	152
三、合成切削液的维护与管理	96	三、变向机构	154
四、切削液使用中的常见问题及其对策	96	四、操作机构	155
思考题与练习题	98	五、开合螺母机构	157
第六章 已加工表面质量	99	第四节 车床常见故障与调整	157
第一节 已加工表面质量概述	99	一、主轴启动、停止不正常	157
一、已加工表面的形成过程	99	二、主轴回转精度下降	159
二、已加工表面质量的范畴	99	三、刀架移动轨迹误差较大	160
三、已加工表面质量对零件使用性能的影响	101	第五节 其他车床	160
第二节 已加工表面粗糙度	102	一、马鞍车床和落地车床	160
一、表面粗糙度产生的原因	102	二、立式车床	161
二、影响表面粗糙度的因素	106	三、转塔车床	162
三、磨削加工影响表面粗糙度的因素	108	四、轧辊车床	163
第三节 加工硬化	109	五、自动和半自动车床	163
		第六节 车削与车刀	164

一、车刀的种类和用途	164	二、铣刀	221
二、机夹式车刀	165	三、铣削用量及其选择	225
三、可转位车刀	166	四、铣刀寿命及其选择	227
四、焊接车刀	172	五、铣刀使用中注意的问题	229
五、成形车刀	175	六、铣削力	229
六、车刀几何参数合理选择的综合 分析	175	七、铣削方式的合理选择	232
思考题与练习题	176	思考题与练习题	234
第十章 磨床	177	第十二章 其他机床	235
第一节 M1432A 型万能磨床	178	第一节 齿轮加工机床	235
一、磨床的结构组成	178	一、滚齿机的运动分析	235
二、磨床的机械传动	179	二、Y3150E 型滚齿机	238
三、机床的机械传动系统	179	第二节 钻床	243
四、机床的主要结构及调整	182	一、立式钻床	243
第二节 磨削加工特点与外圆磨削方法	187	二、台式钻床	244
一、磨削加工特点	187	三、摇臂钻床	244
二、磨削加工的相对运动和磨削速度	188	第三节 镗床	245
三、外圆磨削方法	190	一、卧式镗床	245
第三节 其他磨床简介	191	二、坐标镗床和精镗床	246
一、普通外圆磨床与半自动宽砂轮 外圆磨床	191	第四节 直线运动机床	247
二、无心外圆磨床	191	一、刨床	247
三、内圆磨床	193	二、插床	251
四、平面磨床	194	三、拉床	252
第四节 砂轮的特性及其选择	195	第五节 其他机床常用刀具	253
一、砂轮的组成与特性	195	一、麻花钻的组成与结构	254
二、砂轮的形状和尺寸及代号	202	二、群钻	259
三、砂轮使用过程中的注意事项	203	三、深孔钻	260
思考题与练习题	207	四、铰刀	263
第十一章 铣床	208	五、扩孔钻	266
第一节 卧式万能升降台铣床	209	六、铰钻	266
一、X6132 铣床的组成	209	七、孔加工复合刀具	266
二、X6132 铣床的传动系统	209	八、镗刀	268
三、X6132 铣床的典型结构	212	九、齿轮加工刀具	270
四、顺铣机构	214	十、拉刀	276
第二节 其他铣床	216	十一、刨刀	280
一、万能工具铣床	216	思考题与练习题	281
二、立式铣床	217	附录 金属切削机床型号编制方法	282
第三节 铣床附件——万能分度头	217	一、主要内容规定与适用范围	282
一、FW250 型万能分度头的结构和 传动系统	217	二、通用机床型号	282
二、分度方法	218	三、专用机床的型号	289
第四节 铣削及铣刀	220	四、机床自动线的型号	289
一、铣削	220	五、金属切削机床统一名称和类、组、 系的划分	290
		参考文献	291

绪 论

一、本课程的性质和任务

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。切削工具应有刃口，其材质必须比工件坚硬；不同的刀具结构和切削运动形式，构成不同的切削方法。用刃形和刃数都固定的刀具进行切削的方法有车削、钻削、镗削、铣削、刨削、拉削和锯切等；用刃形和刃数都不固定的磨具或磨料进行切削的方法有磨削、研磨、珩磨和抛光等。

金属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、按加工方式四种分类方法。

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、超精加工、抛光、齿轮加工、蜗轮加工、螺纹加工、超精密加工、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。粗加工是用大的切削深度，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。按表面成形方法，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。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，刀具和工件的瞬时心线相互作纯滚动，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。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。

金属机械零件加工按加工方式分为塑性加工、加热加压成形加工、机械加工、高能加工、电及化学加工等到几大类。塑性加工又可分热锻加工、轧压加工、冷拔加工、挤压加

工、冷锻加工、剪切加工和弯曲加工。加热加压成形加工又分砂型铸造、特种铸造、注入成形、焊接（摩擦焊、钎焊）、金属喷镀、粉末冶金。机械加工又可分为用刀具加工——切削加工、用磨料加工和液压喷射加工。用磨料加工还可分为磨削、珩磨、超精加工、研磨、抛光、滚筒加工、超声波加工和喷射加工。高能加工可分为火焰切割、等离子加工、放电加工、电子束加工、离子束加工和激光束加工。电及化学加工可细分为电化学加工、电解抛光、电镀、电铸、化学加工和化学抛光等。虽然毛坯制造精度不断提高，精铸、精锻、挤压、粉末冶金等加工工艺应用日益广泛，但由于切削加工的适应范围广，且能达到很高的精度和很低的表面粗糙度，在机械制造工艺中仍占有重要地位。

本教材包含金属切削加工和磨削加工中的金属切削原理、金属切削刀具和金属切削机床等综合内容。

金属切削原理和金属切削刀具是研究金属切削加工的一门技术科学。材料的切削加工是用一种硬度高于工件材料的单刃刀具或多刃刀具，在工件表层切去一部分预留量，使工件达到预定的几何形状、尺寸准确度、表面质量以及低加工成本的要求。切削过程中牵涉到刀刃前端工件材料的大塑性变形（剪切应变约为 $2\sim 8$ ）、高切削温度（可达或超过 1000°C ），新鲜的具有化学敏感性的切出表面，刀具以及加工表面的相当高的机械应力和刀具的磨损或破损。因此，这门科学与金属物理学、金属工艺学，力学、热学、化学、弹塑性理论、工程数学、计算技术、电子学和生产管理与经济等有着密切的联系。

金属切削机床就是用切削的方法将金属毛坯（或半成品）加工成机器零件的机器，本教材主要介绍机床的性能、结构、传动、调整、维护等方面的基础知识和切削加工时刀具的材料、角度的选择和切削加工时切削用量的制订；切削不同零件时机床的调整等基础知识。

本课程是一门专业基础课，它为这一专业的培养目标即培养机械制造设计、机械制造和机械维修与保养的工程师服务，并为本专业的后续课程和其他专业选修课等以及专业课程课程设计、毕业设计提供必要的基础知识。

学生通过本课程的教学、实验，并配合生产实习，应达到下列要求。

在基本理论方面，掌握金属切削及磨削过程中切削变形、切削力、切削热及切削温度、刀具磨损、破损的基本理论与基本规律。

在基本知识方面，掌握常用刀具材料的种类、性能及其应用范围；掌握材料加工性及加工表面质量的评定标志、影响因素和提高加工性及提高零件加工表面质量的主要措施等知识；掌握切削用量的选用原则，并初步了解切削液的种类，作用和选用；了解切削刀具的材料类型和材料特性，掌握各类机床的加工范围、结构特点、传动系统的分析、机床速度的计算。

在基本技能方面，应具有根据加工条件合理选择刀具材料、刀具几何参数的能力，应具有根据加工条件和使用资料、手册及公式计算切削力和切削功率的能力；应具有根据加工零件的结构形状选择不同的机床和根据加工条件、应用资料和手册制订切削用量；通过观摩、操作、实际动手拆装机床，掌握机床必要的调整、维护知识和正确装夹工件；具有初步解决生产第一线一般技术问题的能力。

此外，还应初步了解国内外在金属、非金属切削（磨削）方面的新成就和发展趋势，对国内切削加工的生产实践有一定的了解，有初步的对生产上提出的切削加工问题进行试验研究的能力；对国内外机床发展趋势有一定的了解。

二、金属切削原理理论的发展

对金属切削理论的研究可以追溯到17世纪，1679年Hooke把他包括6个主要工作的一

组报告汇集一起,写出了单行本《论刀具切削》,这本书中至少包括了 Hooke 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,金属切削理论研究大致从 1850 年算起。

回顾金属切削理论研究一百多年的历史,根据研究重点的不同,可以分为以下三个时期。

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),大致为 1850~1900 年五十多年的时间。1774 年, J. Wilkinson 发明了第一台金属镗床,提高了汽缸的加工精度,减少了汽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,金属切削理论主要研究方向是研究切削过程中切削力和消耗的切削能量,主要的研究者有 H. Cocquihat, Wiebe 和 Joessel。1851 年, 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。1864 年, Joessel 探讨了刀具几何角度对切削力的影响。

在这一时期的后半段,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 1864~1872 年间在一系列金属挤压实验基础上提出了最大剪应力屈服准则,可以认为是塑性本构关系实验与理论研究的开始。到 1873 年和 1878 年 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。

这一时期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,他假设剪切面是剪应力最大面。值得注意的还有塑性力学 Durcker 公式的提出者 Durcker 等力学家的工作。

回顾这一阶段的历史,可以发现,切削理论的研究一开始就是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。考察自然科学的发展史,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,也是居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切削可加工性时期 (Machinability Period),大致从 1900~1930 年共约 30 年时间。在这一时期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 发明高速钢。1930 年前后人们又发明了硬质合金。

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,由于使用了价值两千万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,例如刀具的耐用度、加工表面质量、切屑的排除等。这一时期金属切削理论主要的成果有:1907 年 Taylor 在整整工作了 26 年切除了 3 万吨切屑,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耐用度公式,第一个研究了切削速度和刀具耐用度之间的关系。这一公式对今天预测刀具耐用度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。

切削可加工性 (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 世纪六七十年代达到高峰。在这一时期总结了上两个时期的研究成果, 将切屑成形机理与切削可加工性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, 这一时期比较重要的工作如下。

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 (其中包括切削速度、切削厚度、热导率)。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、臼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。

这一时期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。

金属切削机理的研究可以说在 20 世纪 60~80 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。在这一时期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。

20 世纪 80 年代以后随着计算机技术、自动控制技术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方面。对金属切削过程本身现象发生机理的研究相对较少。编者认为要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。而且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。

回顾历史, 展望未来, 金属切削理论今后的发展方向主要有以下两个方面。

① 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加工方法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。在实验和理论分析计算等方面应用计算机作为一种强有力的工具, 以求得到更为精确的理论结果, 开拓新的研究领域。

② 金属切削过程是一个复杂的动态过程, 它具有比常规力学试验大得多的变形和高得多的应变率。金属切削过程中既有弹性变形, 又有塑性变形, 还有很高的切削温度和复杂的摩擦条件, 所以金属切削过程的力学实质到目前为止还有许多未能彻底搞清楚的地方, 对金属切削力学机理的研究必将有助于力学的发展和进步, 这已经被前人的实践所证明, 也必将

被未来的实践所证实。例如,当前力学研究的前沿之一是对在高应变率下材料动态力学性能的研究,切削过程正是这样一个大应变和高应变率的过程,运用切削方法可为研究这一动态过程的力学特性提供方便可靠的实验手段。研究切削过程中材料的变形机理应该成为这一研究方向的重要内容。

总之,金属切削机理研究并不是已经没有可以值得研究的内容,相反,在这一领域里还有许多值得我们去研究探讨和加以完善的内容。

三、切削加工技术发展

1. 切削加工技术发展

我国的金属切削加工技术,是从青铜器时代开始萌芽的,并逐渐形成和发展。从殷商到春秋时期已经有了相当发达的青铜冶铸业,出现了各种青铜工具,如青铜刀、青铜锉、青铜锯等。同时有出土文物与甲骨文记录表明,这个时期生产的青铜工具和生活工具,在制造过程中大都要经过切削加工或研磨。西汉时期(公元前206~公元23),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。我国的冶铸技术比西欧早1000多年。渗碳、淬火和炼钢技术的发明,为制造坚硬锋利的工具提供了便利的条件。铁质工具的出现,表明金属切削加工进入了一个新的阶段。有记载表明早在3000多年前的商代已经有了旋转的琢玉工具,这也就是金属切削机床的前身。20世纪70年代在河北满城一号汉墓出土的五铢钱,其外圆上有经过车削的痕迹,刀花均匀,切削振动波纹清晰,椭圆度很小。有可能将五铢钱穿在方轴上然后装夹在木质的车床上,用手拿着工具进行切削。

公元8世纪的时候我国就有了金属切削车床。到了明代,手工业有了很大的发展,各种切削方法有了较细的分工,如车、铣、钻、磨等。从北京古天文台上的天文仪器可以看出当时采用了与20世纪五六十年代类似的加工方法。这也就说明当时就有较高精度的磨削、车削、铣削、钻削等。其动力是畜力和水力。

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。如图0-1所示。铣刀类似现代的镶片铣刀,刀片磨钝后可用图0-2所示的脚踏刃磨机磨。

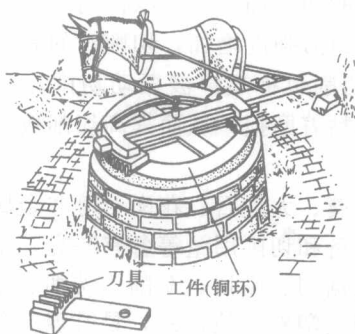


图 0-1 畜力驱动多齿刀具铣削天文仪上大铜环

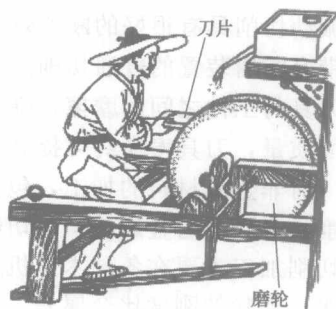


图 0-2 1668 年的脚踏刃磨机

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,切削加工中又开始使用电力。

对金属切削原理的研究始于19世纪50年代,对磨削原理的研究始于19世纪80年代,

此后各种新的刀具材料相继出现。19 世纪末出现的高速钢刀具,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 年出现的硬质合金刀具,使切削速度比高速钢刀具又提高两倍以上;20 世纪 30 年代以后出现的金属陶瓷和超硬材料(人造金刚石和立方氮化硼),进一步提高了切削速度和加工精度。

20 世纪七八十年代,工具材料进一步得到发展,硬质合金和高速钢的规格和品种不断增加。如涂层硬质合金、立方氮化硼、陶瓷等。

到了 20 世纪 80 年代数控、数显设备也开始发展起来。由于受当时电子设备、微机、传输等影响,没有太大的发展空间。随着电子设备、微机、传输速率的快速发展,数控、数显设备也快速发展起来。

切削加工质量主要是指工件的加工精度和表面质量(包括表面粗糙度、残余应力和表面硬化)。随着技术的进步,切削加工的质量不断提高。18 世纪后期,切削加工精度以毫米计;20 世纪初,切削加工的精度最高已达 0.01mm;至 20 世纪 50 年代,切削加工精度已达微米级;20 世纪 70 年代,切削加工精度又提高到 0.1 μ m。

影响切削加工质量的主要因素有机床、刀具、夹具、工件毛坯、工艺方法和加工环境等方面。要提高切削加工质量,必须对上述各方面采取适当措施,如减小机床工作误差、正确选用切削工具、提高毛坯质量、合理安排工艺、改善环境条件等。

提高切削用量以提高材料切除率,是提高切削加工效率的基本途径。常用的高效切削加工方法有高速切削、强力切削、等离子弧加热切削和振动切削等。

磨削速度在 45m/s 以上的切削称为高速磨削。采用高速切削(或磨削)既可提高效率,又可减小表面粗糙度。高速切削(或磨削)要求机床具有高转速、高刚度、大功率和抗振性好的工艺系统;要求刀具有合理的几何参数和方便的紧固方式,还需考虑安全可靠的断屑方法。

强力切削指大进给或大切深的切削加工,一般用于车削和磨削。强力车削的主要特点是车刀除主切削刃外,还有一个平行于工件已加工表面的副切削刃同时参与切削,故可把进给量比一般车削提高几倍甚至十几倍。与高速切削比较,强力切削的切削温度较低,刀具寿命较长,切削效率较高;缺点是加工表面较粗糙。强力切削时,径向切削力很大故不适于加工细长工件。

振动切削是沿刀具进给方向、附加低频或高频振动的切削加工,可以提高切削效率。低频振动切削具有很好的断屑效果,可不用断屑装置,使刀刃强度增加,切削时的总功率消耗比带有断屑装置的普通切削降低 40% 左右。高频振动切削也称超声波振动切削,有助于减小刀具与工件之间的摩擦,降低切削温度,减小刀具的粘着磨损,从而提高切削效率和加工表面质量,刀具寿命约可提高 40%。

对非金属材料的加工,包括木材、塑料、橡胶、玻璃、大理石、花岗石等非金属材料的切削加工,虽与金属材料的切削类似,但所用刀具、设备和切削用量等各有特点。木材制品的切削加工主要在各种木工机床上进行,其方法主要有锯切、刨切、车削、铣削、钻削和砂光等。塑料的刚度比金属差,易弯曲变形,尤其是热塑性塑料导热性差,易升温软化。故切削塑料时,宜用高速钢或硬质合金刀具,选用小的进给量和高高的切削速度,并用压缩空气冷却。若刀具锋利、角度合适,可产生带状切屑,易于带走热量。玻璃(包括锗、硅等半导体材料)的硬度高而脆性大,对玻璃的切削加工常用切割、钻孔、研磨和抛光等方法。对厚度在 3mm 以下的玻璃板,最简单的切割方法是用金刚石或其他坚硬物质,在玻璃表面手工刻划,利用刻痕处的应力集中,即可用手折断。对大理石、花岗石和混凝土等坚硬材料的加

工, 主要用切割、车削、钻孔、刨削、研磨和抛光等方法。切割时可用圆锯片加磨料和水; 外圆和端面可采用负前角的硬质合金车刀, 以 $10\sim 30\text{m/min}$ 的切削速度车削; 钻孔可用硬质合金钻头; 大的石料平面可用硬质合金刨刀或滚切刨刀刨削; 精密平滑的表面, 可用三块互为基准对研的方法, 或磨削和抛光的方法获得。

2. 金属切削刀具的发展概况

金属切削刀具是机械制造中用于切削加工的工具, 又称切削工具。广义的刀具还包括磨具。绝大多数的刀具是机用的, 但也有手用的。通常所说的刀具指金属切削刀具, 切削木材的刀具称为木工刀具。

刀具的发展在人类进步的历史上占有重要的地位。中国早在公元前 28 世纪~前 20 世纪, 就已出现黄铜锥和紫铜的锥、钻、刀等铜质刀具。战国后期 (公元前 3 世纪), 由于掌握了渗碳技术, 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铣刀。1792 年, 英国的莫兹利制出丝锥和板牙。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。那时的刀具是用整体高碳工具钢制造的, 许用的切削速度约为 5m/min 。1868 年, 英国的穆舍特制成含钨的合金工具钢。1898 年, 美国的泰勒和怀特发明高速钢, 1923 年, 德国的施勒特尔发明硬质合金。

在采用合金工具钢时, 刀具的切削速度提高到约 8m/min , 采用高速钢时, 又提高两倍以上, 到采用硬质合金时, 又比用高速钢提高两倍以上, 切削加工出的工件表面质量和尺寸精度也大大提高。由于高速钢和硬质合金的价格比较昂贵, 刀具出现焊接和机械夹固式结构。1949 年~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。1938 年, 德国德古萨公司取得关于陶瓷刀具的专利。1972 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。

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。

刀具技术的发展方向如下。

① 开发高性能的刀具材料, 如硬质合金、陶瓷等, 研发适应硬切削、干式切削和高速切削的高性能刀具材料是当前研究的热点。

② 开发精密和超精密加工刀具, 这类刀具的研究代表了一个国家制造领域的高技术水平, 直接影响到机械、国防、电子、计算机等许多方面的发展。超精密刀具技术主要是金刚石刀具刃磨技术和其他新型超硬刀具材料的研究与开发。

③ 开发多功能刀具, 多功能刀具是指用一把刀就能实现数把刀才能实现的加工, 即实现一次安装多次走刀完工的要求。发展这样的刀具可有效避免频繁换刀和对刀, 减少辅助时间, 提高生产率和加工精度; 开发适应性超强的柔性化刀具, 当今材料种类繁多, 如一种或几种材料对应设计一把专用刀具, 不但会造成刀具的设计、制造、管理和选用等许多麻烦问题, 而且各种制造、管理费用也高。因此, 开发通用性好、适应性强, 能够在多种条件下均能正常工作的刀具是刀具业的一个发展方向。

④ 开发高速切削刀具。高速切削技术是切削技术发展的方向, 其优势在于只需切一刀就可高速切除大量的多余材料而又达到很高的加工精度和表面质量。而高速切削技术所依赖的关键技术之一就是相应的高速切削刀具。

⑤ 开发环保型刀具。环境保护是人类社会赖以生存和发展的需要。近年来的“绿色制造工程”、“无公害切削技术”、“清洁化生产”等应运而生，而环保型刀具技术是解决这些问题的重要手段之一。因此，开发各种高刚性、高稳定性、高抗振性、高锋利性、低摩擦、低噪声、无需切削液的干式切削刀具是刀具发展的一个重要方向。

⑥ 开发高刚性连接系统、模块化工具系统以及刀具监控与诊断系统。零件的加工精度、生产率和成本、刀与机的连接刚性与换刀精度、刀具的磨损、刀具的高稳定性和可靠性等许多问题均与上述各系统有着密切的关系。因此，开发这类系统是整个制造业发展的需要。

四、金属切削机床的发展概况

金属切削机床是用切削的方法将金属毛坯加工成机器零件的机器，它是制造机器的机器，所以又称为“工作母机”或“工具机”，习惯上简称为机床。

金属切削机床是人类在改造自然的长期生产实践中，不断改进生产工具的基础上产生和发展起来的。最原始的机床是依靠双手的往复运动，在工件上钻孔。最初的加工对象是木料。为加工回转体，出现了依靠人力使工件往复回转的原始车床。在原始加工阶段，人既是提供机床的动力，又是操纵者。

机床主要包括：金属切削机床，主要用于对金属进行切削加工；木工机床，用于对木材进行切削加工；特种加工机床，用物理、化学等方法对工件进行特种加工；锻压机械。狭义的机床仅指使用的最广泛、数量最多的金属切削机床。机床是机械工业的基本生产设备，它的品种、质量和加工效率直接影响着其他机械产品的生产技术和经济效益。因此，机床工业的现代化水平和规模，以及所拥有机床的数量和质量是一个国家工业发达程度的重要标志之一。

公元前 2000 多年出现的树木车床是机床最早的雏形。工作时，脚踏绳索下端的套圈，利用树枝的弹性使工件由绳索带动旋转，手拿贝壳或石片等作为刀具，沿板条移动工具切削工件。中世纪的弹性杆棒车床运用的仍是这一原理。15 世纪由于制造钟表和武器的需要，出现了钟表匠用的螺纹车床和齿轮加工机床以及水力驱动的炮筒镗床。1500 年左右，意大利人列奥纳多·达芬奇曾绘制过车床、镗床、螺纹加工机床和内圆磨床的构想草图，其中已有曲柄、飞轮、顶尖和轴承等新机构。我国《天工开物》中也记载有磨床的结构，用脚踏的方法使铁盘旋转，加上沙子和水剖切玉石。18 世纪的工业革命推动了机床的发展。1774 年，英国人威尔金森发明了较精密的炮筒镗床。次年，他用这台炮筒镗床镗出的汽缸，满足了瓦特蒸汽机的要求。为了镗制更大的汽缸，他又于 1776 年制造了一台水轮驱动的汽缸镗床，促进了蒸汽机的发展。从此，机床开始用蒸汽机通过主轴驱动。1797 年，英国人莫兹利创制成的车床由丝杠传动刀架，能实现机动进给和车削螺纹，这是机床结构的一次重大变革。莫兹利也因此被称为“英国机床工业之父”。19 世纪，由于纺织、动力、交通运输机械和军火生产的推动，各种类型的机床相继出现。1817 年，英国人罗伯茨创制龙门刨床；1818 年，美国人惠特尼制成卧式铣床；1876 年，美国制成万能外圆磨床；1835 年和 1897 年又先后发明滚齿机和插齿机。随着电动机的发明，机床开始先采用电动机集中驱动，后又广泛使用单独电动机驱动。20 世纪初，为了加工精度更高的工件、夹具和螺纹加工工具，相继创制出坐标镗床和螺纹磨床。同时为了适应汽车和轴承等工业大量生产的需要，又研制出各种自动机床、仿形机床、组合机床和自动生产线。

随着电子技术的发展，美国于 1952 年研制成第一台数字控制机床；1958 年研制成能自动更换刀具、以进行多工序加工的加工中心。从此，随着电子技术和计算机技术的发展和应用，使机床在驱动方式、控制系统和结构功能等方面都发生了显著的变革。

机床未来的发展趋势是：进一步应用电子计算机技术、新型伺服驱动元件、光栅和光导纤维等新技术，简化机械结构，提高和扩大自动化工作的功能，使机床适应于纳入柔性制造系统工作；提高功率主运动和进给运动的速度，相应提高结构的动、静刚度以适应采用新型刀具的需要，提高切削效率；提高加工精度并发展超精密加工机床，以适应电子机械、航天等新兴工业的需要；发展特种加工机床，以适应难加工金属材料和其他新型工业材料的加工，总之高速、高效、复合、精密、智能、环保等是世界机床的发展趋势。