

巍巍交大 百年书香
www.jiaodapress.com.cn
bookinfo@sjtu.edu.cn



策划编辑 高宇
责任编辑 胡思佳
封面设计 刘文东



河南省“十四五”普通高等教育规划教材
河南省本科高校新工科新形态教材

机械制造技术

机械制造技术

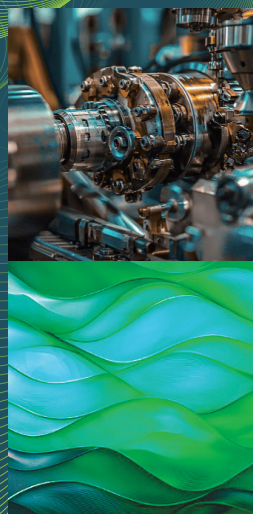
主编 刘一扬 王雪梅



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

机械制造技术

主编 刘一扬 王雪梅



免费提供

精品教学资料包

服务热线: 400-615-1233
www.xinsijiaocai.com



扫描二维码
关注上海交通大学出版社
官方微信

ISBN 978-7-313-33746-7



定价: 59.00元



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



河南省“十四五”普通高等教育规划教材
河南省本科高校新工科新形态教材

机械制造技术

主 编 刘一扬 王雪梅

副主编 王东霞 翟会丽 吴珍珍



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书除绪论外共分为 6 章,内容包括金属切削原理与刀具、金属切削机床与加工方法、金属切削机床夹具设计、工艺规程的设计、机械加工质量、先进制造技术。

本书既可作为普通高等院校机械制造技术课程的教材,也可作为相关技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械制造技术 / 刘一扬,王雪梅主编. -- 上海 :
上海交通大学出版社, 2025. 10. -- ISBN 978-7-313
-33746-7

I. TH16

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2025N6W824 号

机械制造技术

JIXIE ZHIZAO JISHU

主 编:刘一扬 王雪梅

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

印 制:大厂回族自治县聚鑫印刷有限责任公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1 / 16

字 数:515 千字

版 次:2025 年 10 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-33746-7

定 价:59.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:17.5

印 次:2025 年 10 月第 1 次印刷

电子书号:ISBN 978-7-89564-507-3

版权所有 侵权必究

告读者:如您发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0316-8836866

前言

机械制造工业作为国民经济的基石,其技术水平体现了国家的综合实力。在科技迅猛发展的今天,机械制造技术持续推陈出新。《教育强国建设规划纲要(2024—2035 年)》明确指出,要落实立德树人根本任务,加快建设高质量教育体系,培养德智体美劳全面发展的社会主义建设者和接班人,加快建设现代职业教育体系,培养大国工匠、能工巧匠、高技能人才。这为机械制造领域的教育发展指明了方向。

在此背景下,编者紧密贴合行业发展与政策导向,深入了解行业发展动态,广泛调研企业实际需求,并与中国一拖集团有限公司、东风汽车集团有限公司、郑州宇通集团有限公司等 8 家企业深度合作,按照机械制造技术的内在逻辑,遵循从基础理论到实际应用的原则编排了本书。本书从介绍金属切削原理等基础知识入手,再逐步深入阐释机床夹具设计、机械加工工艺规程设计等内容,帮助学生建立起完整的知识体系。书中还编入了先进制造技术,如增材制造技术、智能制造技术等;融入了行业的新标准、新工艺、新方法、新材料,让学生了解学科前沿动态,增强了教材的时代感;紧密结合生产实际,选取合作企业中具有代表性的真实工程案例,将理论知识融入实际问题的解决中,帮助学生提高运用所学知识解决实际工程问题的能力,突出了实践能力培养、创新能力培养和工程素养培养的特色。教材编排结构合理、图表丰富,文字表述准确、简洁、通俗易懂;提供丰富的配套教学资源,如电子教案、课件、习题库、案例库等,为教师的教学和学生的学习提供便利。

本书在编写过程中,结合机械制造技术课程的特点,深度践行课程思政理念。通过讲述机械制造领域大国工匠故事、剖析民族企业崛起历程等内容,将爱国主义精神、工匠精神、创新精神等巧妙融入知识学习中,在提升学生专业知识技能的同时,培养其家国情怀与社会责任感,引导学生努力把科技自立自强信念自觉融入人生追求之中,努力把自我发展融入推动全面建成社会主义现代化强国、实现第二个百年奋斗目标、以中国式现代化全面推进中华民族伟大复兴的实践中,自觉为我国从制造大国迈向制造强国贡献力量。

本书是机械制造技术课程建设成果,该课程 2021 年获批河南省本科高等学校精品在线开放课程,2022 年获批河南省线上一流本科课程,2023 年获批河南省本科高校新工科新形态教材建设项目。本书可作为机械设计制造及其自动化、机械工程、车辆工程、智能制造工程、机械电子工程、测控技术与仪器、复合材料成型工程等本科专业机械制造技术课程的教材,也可作为机械制造行业工程技术人员的培训教材。

本书由郑州财经学院刘一扬、王雪梅担任主编,郑州财经学院王东霞、翟会丽、吴珍珍担任副主编,参加编写的还有郑州财经学院张明慧、乔亚慧、乔谷阳、田海兰、刘灵歌等,郑州财经学院胡修池对全书进行了审定。编者在编写过程中得到了河南理工大学卞平艳、李瑜等的热情支持和帮助,在此表示衷心的感谢。编者还参阅了国内外有关著作和资料,在此谨向相关作者致以诚挚的谢意。

由于编者水平有限,书中疏漏之处在所难免,恳请广大读者多提宝贵意见,以求不断完善本书的内容。

编 者

目 录

绪论	1
0.1 机械制造业在国民经济中的地位和作用	1
0.2 我国机械制造业的发展历程及现实挑战与未来方向	3
0.3 机械制造技术的发展趋势	4
0.4 机械制造业面临的核心挑战与应对策略	5
0.5 机械制造技术课程的主要内容	5
0.6 机械制造技术课程的学习方法	5
第1章 金属切削原理与刀具	7
1.1 切削运动与要素	7
1.2 切削刀具	9
1.3 刀具材料	23
1.4 金属切削过程与现象	27
1.5 切削力与切削功率	31
1.6 切削热与切削温度	35
1.7 刀具磨损与刀具寿命	40
1.8 切削用量的选择及工件材料的切削加工性	44
第2章 金属切削机床与加工方法	48
2.1 金属切削机床的基础知识	49
2.2 车削加工	54
2.3 铣削加工	56
2.4 刨削、拉削加工	59
2.5 钻削和镗削加工	62
2.6 磨削加工	64
2.7 齿轮加工	68

2.8 数控加工	69
2.9 高速加工	73
第3章 金属切削机床夹具设计	78
3.1 机床夹具概述	78
3.2 工件的定位	83
3.3 定位误差的分析计算	94
3.4 工件的夹紧	97
3.5 典型机床夹具	104
3.6 现代机床夹具	115
3.7 机床夹具设计的基本要求和步骤	122
3.8 机床夹具设计实例	124
第4章 工艺规程的设计	131
4.1 机械加工工艺过程的基本概念	132
4.2 机械加工工艺规程的设计	136
4.3 加工余量、工序尺寸及工艺尺寸链	150
4.4 机械加工工艺过程的技术经济分析及工艺文件	163
4.5 典型零件加工工艺过程分析	169
4.6 数控加工工艺过程分析与设计	177
4.7 机器装配工艺设计基础	183
第5章 机械加工质量	203
5.1 机械加工精度的基础知识	203
5.2 影响加工精度的因素	206
5.3 加工误差的综合分析	221
5.4 提高加工精度的工艺措施	231
5.5 机械加工表面质量	238
第6章 先进制造技术	256
6.1 特种加工技术	256
6.2 增材制造技术	259
6.3 超精密加工技术	262
6.4 智能制造技术	266
6.5 制造执行系统	267
参考文献	273

绪论

机械制造技术是机械工程的核心领域之一,涵盖从原材料到成品的整个生产过程,涉及设计、加工、装配、检测等多个环节。机械制造技术作为现代工业发展的基石,扮演着至关重要的角色。它不仅是衡量一个国家工业水平高低的重要标志,更是推动社会生产力进步的关键因素。机械制造技术的发展历程源远流长,从最初的简单手工操作,到如今的自动化、智能化生产,经历了翻天覆地的变化。



微课
绪论

随着科技的不断进步,机械制造技术正朝着更高效、更精确、更环保的方向发展。高精度加工技术、快速成型技术、智能制造技术等新兴技术的不断涌现,为机械制造行业注入了新的活力。这些技术的应用,不仅提高了产品的质量和生产效率,还大大降低了生产成本,为企业创造了更大的经济效益。

0.1 机械制造业在国民经济中的地位和作用

机械制造业作为国民经济的重要支柱,其地位和作用不容忽视。它不仅是工业生产的基础,更是国家综合实力的重要体现。从汽车、飞机等大型装备的制造,到精密仪器、电子产品的研发生产,机械制造业无处不在,为各行各业提供着关键的技术支持和装备保障。

在我国,机械制造业在国民经济中的地位和作用主要体现在以下方面。

0.1.1 支柱产业地位

机械制造业总体的经济占比举足轻重。机械制造业占中国工业总产值的比重长期保持在 20% 以上(如 2023 年占比为 21%~22%),是仅次于电子信息产业的第二大工业门类。

机械制造细分领域贡献突出。汽车制造业:2023 年产值突破 9.3 万亿元,占机械工业总产值的 1/3;工程机械:全球市场份额超 30%,挖掘机、起重机出口量连续多年位居全球第一。

0.1.2 经济增长的核心动力

机械工业产值增速常年高于工业整体产值增速(如 2023 年机械工业产值增速为 6.5%,工业整体产值增速为 4%),机械工业对工业整体的产值增长贡献率超 25%。乘数效应显著,每 1 元机械制造业产值可带动上下游产业链(如钢铁、电子、物流)2~3 元的协同产出。

0.1.3 促进就业的重要力量

机械制造业的直接就业规模庞大,直接从业人员超2 000万人(2023年数据),占制造业总就业人数的15%。龙头企业带动就业效应明显,如比亚迪全球员工超70万人,研发人员占比超12%;三一重工全球员工超6万人,间接拉动供应链就业超50万人。机械制造业每增加1个岗位,可带动上下游3~4个岗位(如原材料供应、物流运输、售后服务等),间接拉动就业网络广泛,机械制造业合计拉动就业超8 000万人。

0.1.4 技术创新的主战场

1. 研发投入与成果转化

2023年机械行业研发经费投入强度[研发经费投入强度是衡量一个国家或地区科技创新投入水平的重要指标,通常指研发经费支出占国内生产总值(GDP)的比重]达2.5%,高于制造业平均水平(2.0%)。大疆无人机,全球消费级无人机市场占有率(简称市占率)超70%;高铁装备,中国中车高铁动车组国产化率超95%,出口112个国家和地区;C919大飞机,国产化率60%,带动200余家国内企业参与配套生产。

2. 推动产业升级

智能制造装备(如工业机器人、数控机床)国产化率从2015年的20%提升至2023年的50%,加速制造业向高端化、智能化、绿色化转型。

0.1.5 国际竞争力的核心载体

1. 出口创汇主力军

2023年机械产品出口额达2.3万亿美元,占全国出口总额的35%,机械产品连续多年稳居第一大类出口商品。工程机械出口额突破443亿美元,徐工、三一重工的市场份额占据全球起重机市场半壁江山;新能源汽车出口超120万辆,宁德时代动力电池全球市占率达37%。

2. 深度参与全球产业链

中国机械制造业为全球提供30%以上的汽车零部件、40%的工程机械整机,成为跨国企业(如特斯拉、西门子)的核心供应商。

0.1.6 产业协同与区域发展

机械制造业带动关联产业升级。机械制造业的需求拉动钢铁、有色金属、芯片等基础产业技术升级(如高端轴承钢、车规级芯片国产化)。典型案例:新能源汽车产业带动锂电池、充电桩、智能驾驶等新兴产业爆发式增长。

机械制造业区域经济集群效应明显。在长三角、珠三角已形成万亿级机械制造集群。长三角的汽车(上汽、特斯拉上海超级工厂)、船舶制造(江南造船)全球领先;珠三角的家电(美的、格力)、消费电子(大疆、华为)与装备制造深度融合。

0.1.7 国家战略支撑作用

机械制造业助力国家在关键领域(如核电装备、重型燃气轮机等)实现自主可控,降低“卡脖子”风险;服务“双碳”目标,如新能源装备(光伏设备、风电设备)产能占全球60%以上,助力全球能源转型。

综上,机械制造业通过产值贡献、就业拉动、技术创新、出口创汇、产业协同五大核心作用,成为国民经济的“压舱石”和“推进器”。未来,随着智能装备、绿色制造、服务型制造等新模式的深化,其战略地位将进一步提升,为中国从“制造大国”迈向“制造强国”提供核心支撑。

0.2 我国机械制造业的发展历程及现实挑战与未来方向

0.2.1 我国机械制造业的发展历程

我国机械制造业的发展历程可划分为以下5个阶段。

1. 奠基阶段(1949—1978年):计划经济下的工业化起步

“一五”计划期间(1953—1957年),苏联援建我国156个重点项目,其中机械工业占比超1/3,建成有第一汽车制造厂(1956年投产)、洛阳拖拉机厂等。

1956年,第一台国产汽车解放CA10卡车下线,生产线年产能3万辆;机床产量方面,1978年达18.3万台(1949年仅0.16万台),但技术水平落后发达国家20年以上。

2. 开放转型阶段(1979—2001年):引进技术与市场化改革

政策突破,“以市场换技术”:1984年上海大众成立,首款桑塔纳国产化率从2.6%(1984年)提升至90%(1996年);乡镇企业发展,万向集团、美的集团从作坊式工厂转型为现代制造企业。

机械工业产值方面:从1978年500亿元增至2000年1.9万亿元;出口占比方面:2000年机械产品出口额363亿美元,占全国出口总额的14.6%。

3. 高速增长阶段(2002—2012年):全球化与规模扩张

工程机械制造业崛起,三一重工(2003年上市)、徐工集团凭借性价比优势抢占国际市场,2010年中国工程机械产值达4300亿元,全球占比超20%;汽车产业爆发式增长,2009年中国汽车产销量突破1300万辆,我国首超美国成全球第一汽车产销量国家;2012年机械产品出口额达4828亿美元,占全球市场份额的15%(2001年仅占3%);2012年全球工程机械制造商50强中,中国企业占11席(三一重工、徐工、中联重科等)。

4. 转型升级阶段(2013—2020年):创新驱动与高端突破

在制造强国战略引领下,通过供给侧结构性改革推动高端装备创新发展,重点突破数控系统、精密部件等关键领域。标志性成果有高铁技术,中国中车2017年推出“复兴号”动车

■ 机械制造技术

组,国产化率超 95%,占全球市场份额的 60%;核电装备,华龙一号(2015 年)国产化率超 90%,出口巴基斯坦、阿根廷;工业机器人,2019 年中国工业机器人产量达 18.7 万台。

5. 高质量发展阶段(2021 年至今):智能化与绿色化

新动能领域:新能源汽车 2023 年产销超 950 万辆,比亚迪、宁德时代主导动力电池市场(占全球市场份额的 37%)。

高端装备:C919 大飞机 2023 年实现商业首飞,国产首艘大型邮轮“爱达·魔都”号 2024 年交付。

出口结构升级:2023 年“新三样”(新能源汽车、锂电池、光伏设备)出口额突破 1.06 万亿元,同比增长 29.9%。

研发投入:2023 年机械行业研发强度达 2.5%,华为、大疆等企业研发投入占比超 15%。

0.2.2 我国机械制造业的现实挑战与未来方向

我国机械制造业的发展日新月异,但目前仍存在短板,如核心部件相对依赖进口,高端轴承、芯片、工业软件对外依存度超 50%,同时面临着全球竞争加剧的挑战,如欧美推动“再工业化”,技术(如光刻机、航空发动机方面)封锁风险上升。对此我国重点突破精密机床、半导体设备等“卡脖子”领域,推广智能制造、绿色制造。

中国机械制造业从“仿制跟踪”到“自主创新”,从“低端代工”到“全球领先”,其发展历程印证了政策引导、市场驱动、技术积累的协同效应,未来需以智能化、绿色化、服务化为主线,巩固全球供应链地位,支撑制造强国目标。

0.3 机械制造技术的发展趋势

近年来,中国机械制造业发展迅速,取得了显著成就。在未来,中国机械制造技术的发展呈现以下趋势。

0.3.1 智能化和自动化将成为主流

随着人工智能、物联网、大数据等技术的不断进步,中国机械制造业将加速向智能化和自动化转型。通过引入智能设备和系统,实现生产过程的自动化监控和管理,提高生产效率和产品质量。同时,利用大数据和人工智能技术,对生产数据进行深度分析和挖掘,为企业的决策提供有力支持。

0.3.2 高端化和精密化是重要发展方向

随着科技的不断进步和市场需求的不断提升,高端装备和精密制造将成为机械制造业的核心竞争力。中国机械制造业将加大研发投入,提升技术水平,努力在高端装备和精密制造领域取得突破,以满足国内外市场的需求。同时,产业协同和区域合作也将进一步加强。通过加强产业链上下游企业的协同合作,形成优势互补、资源共享的产业生态,提升整个机械制造业的竞争力。此外,加强区域间的合作与交流,推动机械制造技术的共享与创新,也

是中国机械制造业发展的重要趋势。

0.3.3 绿色化发展,碳中和驱动制造业全链革新

绿色制造和可持续发展将得到更多关注。在全球环保意识日益增强的背景下,中国机械制造业也将积极响应国家号召,推动绿色制造和可持续发展,通过采用环保材料和工艺,降低生产过程中的能耗和排放,实现经济效益和环境效益的双赢。

例如,采用轻量化与低碳工艺,用碳纤维复合材料、铝合金替代传统钢材,减少能耗。具体应用:比亚迪“刀片电池”采用轻量化设计,能量密度提升 50%;中国商飞 C919 大飞机使用碳纤维复合材料,减重 20%。

0.4 机械制造业面临的核心挑战与应对策略

在机械制造业的广阔领域中,企业正面临着多重核心挑战。首先,技术迭代速度日益加快,要求企业不断投入研发,以保持产品竞争力。然而,高昂的研发成本和较长的研发周期往往成为制约企业创新的瓶颈。其次,市场需求的多样化与个性化趋势越发明显,这对机械制造业的柔性化生产和定制化服务能力提出了更高要求。如何在保证生产效率的同时,满足客户的个性化需求,成为企业亟待解决的问题。

针对这些挑战,机械制造业可采取以下应对策略。一方面,企业应加大技术研发投入,加强与高校、科研机构的合作,共同攻克关键技术难题,提升产品技术含量和附加值。另一方面,推动数字化转型,利用大数据、云计算、人工智能等先进技术优化生产流程,提高生产效率和增强灵活性。同时,加强市场调研,深入了解客户需求,构建以客户为中心的定制化服务模式,以更好地满足市场多样化需求。通过这些措施的实施,机械制造业将能够不断提升自身实力,应对未来的挑战。

0.5 机械制造技术课程的主要内容

本课程以金属切削理论为基础,以金属切削机床和切削刀具为抓手,以机械制造工艺为主线,以获得加工合格的零件、装备为目标,使学生深入了解和掌握机械装备制造的基础理论和基本技术,同时对先进制造技术进行了介绍。

通过本课程的学习,学生能够对机械制造技术有一个总体的、全貌性的了解与把握,能掌握金属切削过程的基本规律和机械加工的基础知识,能选择加工方法与机床、刀具、夹具及加工参数,具备制定工艺规程的能力,掌握机械加工精度和表面质量分析的基础理论。

0.6 机械制造技术课程的学习方法

在机械制造技术课程中,金属切削理论与机械制造工艺具有显著的实践性特征,因此,在学习过程中,必须重视实践环节。单纯依靠课堂听讲或自学教材是不够的,必须通过实

验、现场实习以及工厂调研等手段,在持续的实际操作训练中,加深对书中基础知识点的理解与应用。对于课程的基本概念与理论,必须在实践与理论相结合的循环过程中,通过不断总结、思考、分析和应用,才能达到真正掌握的目标。

拓展阅读

擦亮高端装备新名片

——中国铁建重工集团股份有限公司正高级工程师 张帅坤

2008年大学毕业后,我进入盾构机行业,从事设备的使用和监管工作。当时国内施工所用的盾构机全部依靠进口,成本昂贵且存在“水土不服”现象,容易带来巨大的安全风险以及不可预估的经济损失。

“必须做中国人自己的盾构机!”这样的信念在我心底生根发芽。2010年,我加入了中国铁建重工集团股份有限公司。从此,我和团队一起从零开始,边摸索边学习,走上了自主研发盾构机之路。

2016年9月29日,我和团队研发的国产首台高铁大直径盾构机“望京号”、国产首台铁路双线超大直径盾构机“中原一号”同时下线,结束了我国大直径盾构机施工领域“洋盾构”的垄断局面。“望京号”开挖直径10.87 m,用于京沈客专京冀段望京隧道施工,连续掘进3 168 m,下穿重要建筑物时地面沉降仅0.68 mm,达到世界领先水平。“中原一号”开挖直径12.81 m,用于豫机城际铁路施工,仓内机器人、开挖仓气压掘进新技术的应用,确保设备一次性连续高效掘进3 800 m,有效解决了一系列难题。

此后,经过多年努力,我们的研究成果有效推动超大直径盾构机零部件国产化率从最初的60%左右上升到目前的90%以上,并带动上下游企业累计实现配套产值50亿元以上。这些年,我们团队研制的国产盾构机,不但占据了国内40%的市场份额,还出口到新加坡、韩国等国家。

今后,我和团队将继续瞄准世界科技前沿和国家重大需求,致力于填补行业空白,攻破关键科学技术难题,在世界舞台上擦亮更多中国高端装备新名片。

思考与练习题

1. 简述传统机械制造技术与先进机械制造技术的核心区别,并各举一个典型应用场景说明其特点。
2. 某企业需生产一批汽车发动机连杆,要求轻量化(材料为铝合金)且月产量10万件。请设计两种制造工艺方案,并分析其技术经济性差异。
3. 某机械制造企业为降低成本,拟采用高污染涂装工艺生产农用机械外壳。请从工程伦理和绿色制造角度提出反对意见,并给出两种可行的环保替代方案。

金属切削原理与刀具

教学目标

知识目标:掌握金属切削过程的基本原理(切削运动、切屑形成机理、切削力与热),理解刀具材料性能要求及典型刀具材料的分类与特性,理解切削参数(切削速度、进给量、背吃刀量)的优化选择方法,熟悉刀具几何角度的定义及其对切削性能的影响,认识刀具磨损形式及寿命管理方法。

能力目标:能分析切削过程中物理现象(如积屑瘤、加工硬化)的成因及控制方法,能根据加工条件合理选择刀具材料与几何参数,具备初步的切削参数计算与优化能力。

素质目标:培养工程实践中安全、高效、环保的切削加工意识,了解智能制造背景下刀具技术的发展趋势(如涂层技术、智能刀具)。

教学重点和难点

教学重点:主运动与进给运动的定义差异,切削速度、进给量、背吃刀量的物理意义与工程应用;焊接式/机夹式刀具的结构特点,高速钢、硬质合金的性能差异及适用场景;剪切滑移模型解释切屑形成机理,切削力分量的实验测量方法;刀具失效判定(依据后刀面磨损带VB值),刀具寿命预测(依据泰勒公式)。

教学难点:剪切热与摩擦热占比对温度分布的影响,刀具前刀面最高温现象;相对加工性系数量化,难加工材料(如钛合金)的切削难度;多约束条件下(机床功率、表面粗糙度、刀具成本)平衡切削三要素的协同优化。

金属切削过程是刀具与工件的相互作用过程。在此过程中,为了能去除工件上的多余材料,对刀具结构及其材料需提出相应的要求。本章主要介绍切削运动及其要素、刀具的结构和材料以及切削过程中出现的物理现象。

1.1 切削运动与要素

1.1.1 切削运动

金属切削加工是利用刀具切去工件毛坯上多余的金属层(加工余量),以获得具有一定

尺寸、形状、位置精度和表面质量的机械加工方法。刀具的切削作用是通过刀具与工件之间的相互作用和相对运动来实现的。

刀具与工件间的相对运动称为切削运动,即表面成形运动。切削运动可分解为主运动和进给运动。

(1)主运动是切下切屑所需的最基本运动。在切削运动中,主运动的速度最高,消耗的功率最大。主运动只有一个,如车削时工件的旋转运动、铣削时铣刀的旋转运动。

(2)进给运动是多余材料不断被投入切削,从而加工出完整表面所需的运动。进给运动可以有一个或几个。例如,车削时车刀的纵向和横向运动,磨削外圆时工件的旋转和工作台带动工件的纵向移动。

切削运动及其方向用切削运动的速度矢量来表示。图 1-1 所示为用车刀进行普通外圆车削时的切削运动,图中主运动切削速度 v_c 、进给速度 v_f 和切削运动速度 v_e 之间的关系为

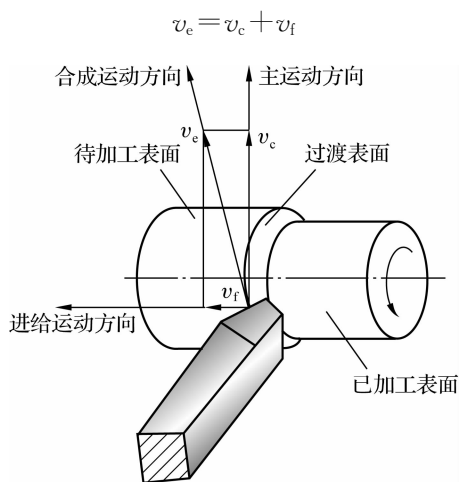


图 1-1 切削运动与切削表面

1.1.2 切削要素

在切削过程中,工件上通常存在着 3 个不断变化的表面(见图 1-1):已加工表面,即工件上已切去切屑的表面;待加工表面,即工件上即将被切去切屑的表面;加工表面(过渡表面),即工件上正在被切削的表面。

切削要素包括切削用量和切削层的几何参数。

1. 切削用量

切削用量是切削时各参数的合称,包括切削速度、进给量和切削深度(也称背吃刀量)三个要素,它们是设计机床运动的依据。

(1)切削速度 v :在单位时间内,刀具和工件在主运动方向上的相对位移,单位为 m/s 。若主运动为旋转运动,则切削速度的计算公式为

$$v = \frac{\pi d_w n f_z}{1\,000 \times 60}$$

式中, d_w 为工件待加工表面或刀具的最大直径(mm); n 为主运动每分钟的往复次数(次/min)。

(2) 进给量 f : 在主运动每转一转或每一行程中(或单位时间内), 刀具和工件之间在进给运动方向上的相对位移, 单位为 mm/r(用于车削、镗削等)或 mm/行程(用于刨削、磨削等)。进给量还可以用进给速度 v_f (单位为 mm/s)或每齿进给量 f_z (用于铣刀、铰刀等多刃刀具, 单位为 mm/齿)表示。一般情况下, 公式为

$$v_f = n f = n z f_z$$

式中, n 为主运动的转速(r/s); z 为刀具齿数。

(3) 背吃刀量 a_p : 待加工表面与已加工表面之间的垂直距离(mm)。车削外圆时, 背吃刀量为

$$a_p = \frac{d_w - d_m}{2}$$

式中, d_w 、 d_m 分别为待加工表面和已加工表面的直径(mm)。

2. 切削层的几何参数

切削层是指工件上正被切削刃切削的一层金属, 也即相邻两个加工表面之间的一层金属。以图 1-2 所示车削外圆为例, 切削层是指工件每转一转, 刀具从工件上切下的那一层金属。切削层的大小反映了切削刃所受载荷的大小, 直接影响到加工质量、生产率和刀具的磨损等。

切削层的几何参数主要包括切削宽度、切削厚度和切削面积。

(1) 切削宽度 a_w : 沿主切削刃方向度量的切削层尺寸(mm)。车外圆时, 有

$$a_w = \frac{a_p}{\sin \kappa_r}$$

式中, κ_r 为切削刃和工件轴线之间的夹角。

(2) 切削厚度 a_c : 两相邻加工表面间的垂直距离(mm)。车外圆时, 有

$$a_c = f \sin \kappa_r$$

(3) 切削面积 A_c : 切削层垂直于切削速度截面内的面积(mm²)。车外圆时, 有

$$A_c = a_w a_c = a_p f$$

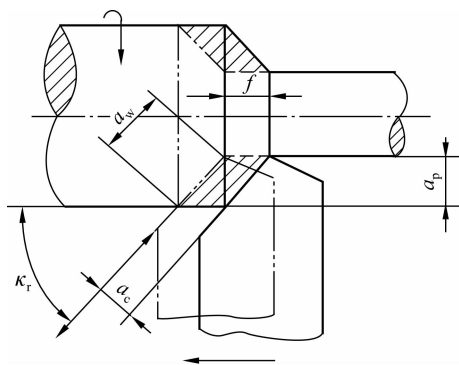


图 1-2 切削用量与切削层

1.2 切削刀具

切削刀具是机械制造中用于切削加工的工具, 作为机械制造领域的核心工具, 其重要性贯穿于产品生产的全流程, 对制造效率、加工质量、生产成本乃至产业技术升级都有着决定性影响。刀具的几何参数对刀具完成切削目标有着极其重要的影响, 这里将介绍刀具的基本几何参数、刀具的种类以及常用刀具。



微课
金属切削刀具

1.2.1 刀具的几何参数

1. 刀具切削部分的组成

切削刀具的种类很多,结构也多种多样。下面以外圆车刀为例说明刀具切削部分的组成。外圆车刀是最基本、最典型的切削刀具,由刀头和刀体组成,如图 1-3 所示。其刀头(又称切削部分)由前面、主后面、副后面、主切削刃、副切削刃和刀尖组成,统称为“三面两刃一尖”。其定义分别如下。

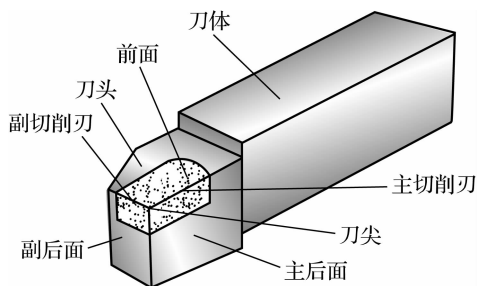


图 1-3 外圆车刀的组成

(1)前面(前刀面):刀具上与切屑接触并相互作用的表面。

(2)主后面(主后刀面):刀具上与工件过渡表面(见图 1-1)接触并相互作用的表面。

(3)副后面(副后刀面):刀具上与工件已加工表面(见图 1-1)接触并相互作用的表面。

(4)主切削刃:前刀面与主后刀面的交线,它完成主要的切削工作。

(5)副切削刃:前刀面与副后刀面的交线,它配合主切削刃完成切削工作,并最终形成已加工表面。

(6)刀尖:连接主切削刃和副切削刃的一段切削刃,它可以是小的直线段或圆弧。

其他各类刀具如刨刀、钻头、铣刀等,都可看作车刀的演变和组合。刨刀切削部分的形状与车刀相同,如图 1-4(a)所示;钻头可看作两把一正一反并在一起同时车削孔壁的车刀,因而有两个主切削刃,两个副切削刃,还增加了一个横刃,如图 1-4(b)所示;铣刀可看作由多把车刀组合而成的复合刀具,其每个刀齿相当于一把车刀,如图 1-4(c)所示。

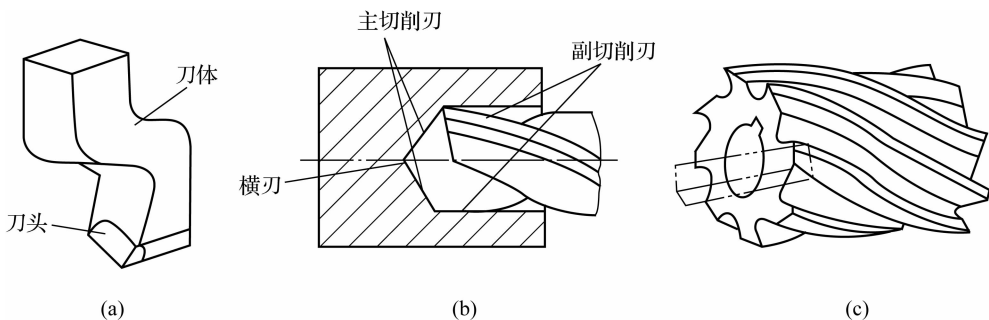


图 1-4 刨刀、钻头、铣刀切削部分的形状

(a)刨刀; (b)钻头; (c)铣刀

2. 刀具角度的参考平面

刀具要从工件上切下金属,必须具有一定的切削角度,也正是切削角度决定了刀具切削部分各表面的空间位置。要确定和测量刀具角度,必须引入三个相互垂直的参考平面,如图 1-5 所示。

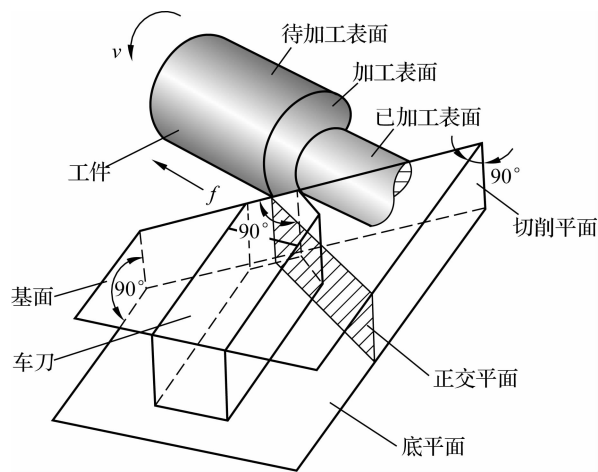


图 1-5 确定车刀角度的参考平面

- (1) 切削平面:通过主切削刃上某一点并与工件加工表面相切的平面。
- (2) 基面:通过主切削刃上某一点并与该点切削速度方向相垂直的平面。
- (3) 正交平面:通过主切削刃上某一点并与主切削刃在基面上的投影相垂直的平面。

切削平面、基面和正交平面共同组成标注刀具角度的正交平面参考系。此外,常用的标注刀具角度的参考系还有法平面参考系、背平面参考系和假定工作平面参考系。

3. 刀具的标注角度

刀具的标注角度是制造和刃磨刀具所必需的并在刀具设计图上予以标注的角度。刀具的标注角度主要有五个,以车刀为例,如图 1-6 所示,定义的几个角度具体如下。

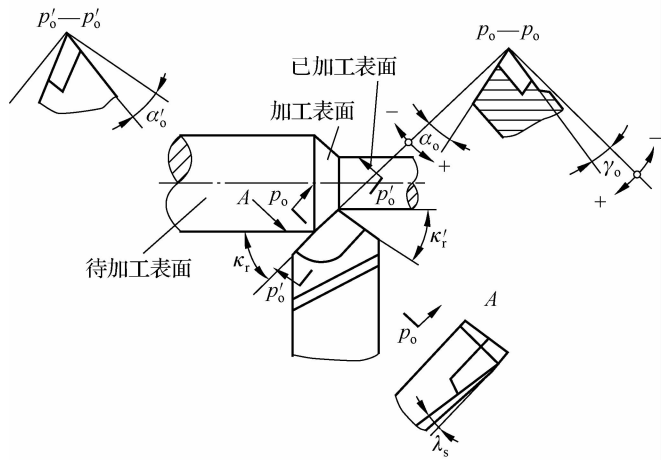


图 1-6 车刀的主要角度

(1) 前角 γ_0 :在正交平面内测量的前面与基面之间的夹角。前角表示前刀面的倾斜程度,有正、负和零值之分。正前角($\gamma_0 > 0$),前刀面相对于基面向前倾斜(即前刀面在基面的下方,朝向刀具切削刃的前方倾斜);负前角($\gamma_0 < 0$),前刀面相对于基面向后倾斜(即前刀面在基面的上方,朝向刀具刀柄方向倾斜);零前角($\gamma_0 = 0$),前刀面与基面平行,介于正前角和负前角之间。

(2) 后角 α_o : 在正交平面内测量的主后面与切削平面之间的夹角。后角表示主后面的倾斜程度, 一般为正值。

(3) 主偏角 κ_r : 在基面内测量的主切削刃在基面上的投影与进给运动方向的夹角。主偏角一般为正值。

(4) 副偏角 κ'_r : 在基面内测量的副切削刃在基面上的投影与进给运动反方向的夹角。副偏角一般为正值。

(5) 刃倾角 λ_s : 在切削平面内测量的主切削刃与基面之间的夹角。当主切削刃呈水平时, $\lambda_s = 0$; 当刀尖为主切削刃上最低点时, $\lambda_s < 0$; 当刀尖为主切削刃上最高点时, $\lambda_s > 0$, 如图 1-7 所示。需要说明的是, 图 1-6、图 1-7 中的标注角度是在刀尖与工件回转轴线等高、刀杆纵向轴线垂直于进给方向并且不考虑进给运动的影响等条件下描述的。

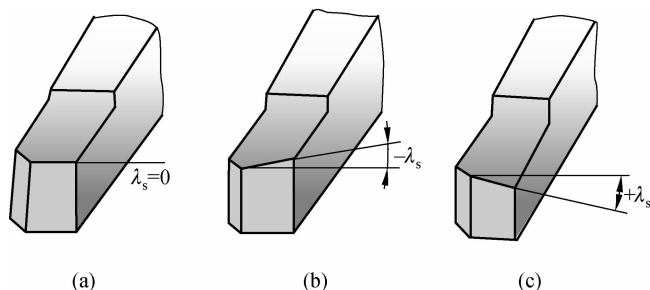


图 1-7 刃倾角的符号

4. 刀具的工作角度

在实际的切削加工中, 由于刀具安装位置和进给运动的影响, 刀具的标注角度会发生一定的变化, 其原因是切削平面、基面和正交平面位置会发生变化。以切削过程中实际的切削平面、基面和正交平面为参考平面所确定的刀具角度称为刀具的工作角度, 又称实际角度。

(1) 刀具安装位置对工作角度的影响。以车刀车外圆为例, 若不考虑进给运动, 当刀尖安装得高于或低于工件轴线时, 刀具的工作前角 γ_{oc} 和工作后角 α_{oc} 如图 1-8 所示。当车刀刀杆的纵向轴线与进给方向不垂直(切削时刀杆轴线纵向偏转 θ) 时, 刀具的工作主偏角 κ_{re} 和工作副偏角 κ'_{re} 如图 1-9 所示。

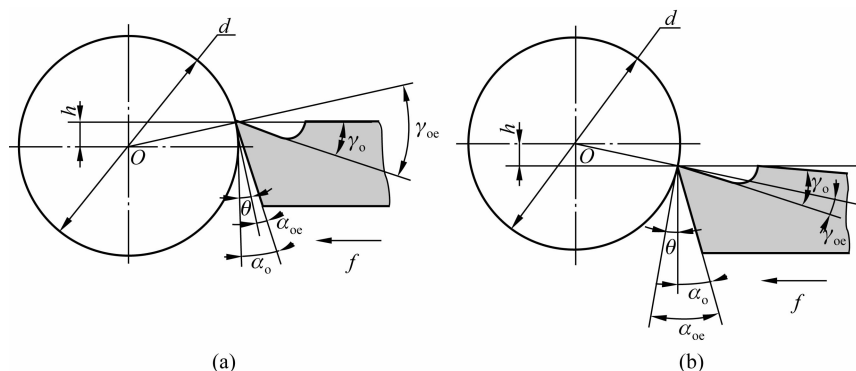


图 1-8 车刀安装高度对工作角度的影响

(a) 刀尖高于工件轴线; (b) 刀尖低于工件轴线

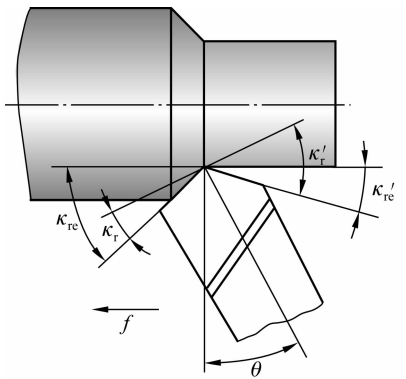


图 1-9 车刀安装偏斜对工作角度的影响

(2)进给运动对工作角度的影响。由于进给运动的存在,车外圆及车螺纹时,加工表面实际上是一个螺旋面(见图 1-10);车端面或切断时,加工表面是阿基米德螺旋面(见图 1-11)。因此,实际的切削平面和基面都要偏转一个附加的螺旋升角 μ ,使车刀的工作前角 γ_{oc} 增大,工作后角 α_{oc} 减小。一般车削时,进给量比工件直径小很多,故螺旋升角 μ 很小,它对车刀工作角度影响不大,可忽略不计。但在车端面、切断和车外圆进给量(或加工螺纹的导程)较大时,则应考虑螺旋升角的影响。

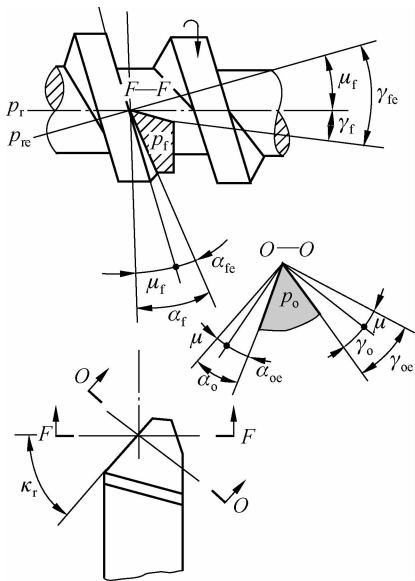


图 1-10 纵向进给运动对工作角度的影响

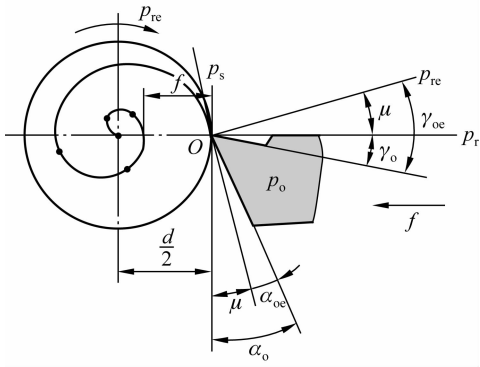


图 1-11 横向进给运动对工作角度的影响

1.2.2 刀具的种类及常用刀具

1. 刀具种类

生产中所使用的刀具种类很多,可按照不同的方式进行分类。

(1)按加工方式和具体用途,刀具可分为车刀、孔加工刀具、铣刀、拉刀、螺纹刀具、齿轮刀具、自动线及数控机床刀具和磨具等几大类型。

(2)按所用材料,刀具可分为高速钢刀具、硬质合金刀具、陶瓷刀具、聚晶立方氮化硼(polycrystalline cubic boron nitride,PCBN)刀具和金刚石刀具等。

(3)按结构形式,刀具可分为整体刀具、镶片刀具、机夹刀具和复合刀具等。

(4)按是否标准化,刀具可分为标准刀具和非标准刀具等。

刀具的种类及其划分方式将随着科学技术的发展而不断变化。

2. 常用刀具简介

1) 车刀

车刀是在金属切削加工中应用最广的一种刀具,可以在车床上加工外圆、端平面、螺纹、内孔,也可用于切槽和切断等。图 1-12 列出了几种常用车刀。

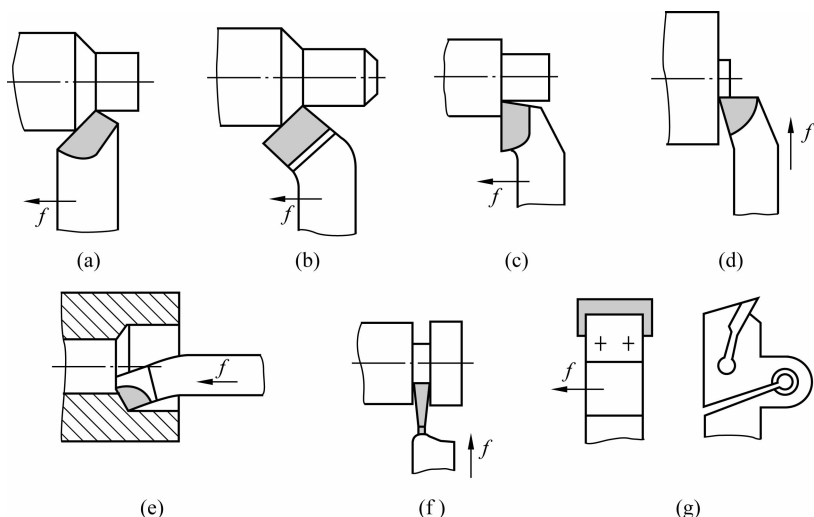


图 1-12 常用的几种车刀

(a)直头外圆车刀;(b)45°弯头外圆车刀;(c)90°弯头外圆车刀;(d)端面车刀;
(e)内孔车刀;(f)切断刀;(g)宽刃光刀

车刀按结构不同可分为整体车刀、焊接装配式车刀和机械夹固式车刀。整体车刀常用高速钢制造,焊接装配式及机械夹固式车刀刀片选择硬质合金作为主要制造材料,刀体制造通常采用 45 钢或合金钢。机械夹固式车刀又分为机夹车刀(见图 1-13)和机夹可转位车刀(见图 1-14)。机械夹固式车刀的切削性能稳定,工人不必磨刀,所以在现代生产中应用越来越多。

2) 孔加工刀具

孔加工刀具一般可分为两大类:一类是从实体材料上加工出孔的刀具,常用的有麻花钻、中心钻和深孔钻等;另一类是对工件上已有孔进行再加工的刀具,常用的有扩孔钻、铰刀及镗刀等。

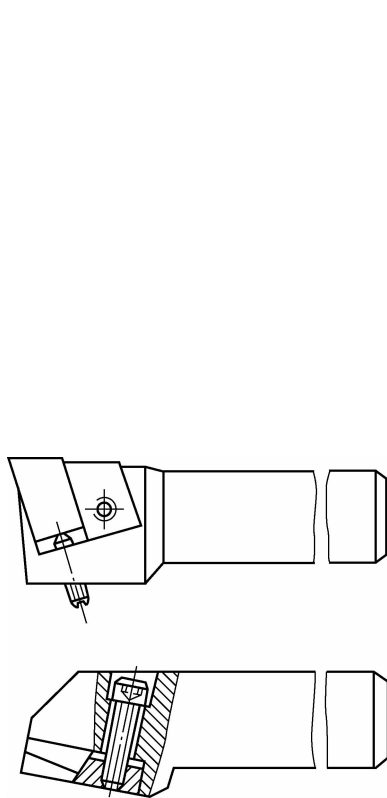
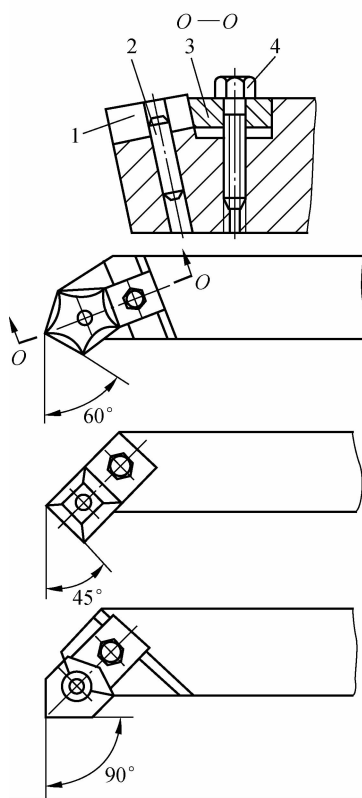


图 1-13 机夹外圆车刀



1—刀片；2—销轴；3—楔块；4—螺钉。

图 1-14 机夹可转位车刀

(1)麻花钻。麻花钻是应用最广的孔加工刀具,特别适合于 $\phi 30$ mm 以下的孔的粗加工,有时也可用于扩孔。麻花钻根据其制造材料分为高速钢麻花钻和硬质合金麻花钻。图 1-15 所示为标准高速钢麻花钻的结构。工作部分(刀体)的前端为切削部分,承担主要的切削工作,后端为导向部分,起引导钻头的作用,也是切削部分的后备部分。工作部分有两个对称的刃瓣(通过中间的钻芯连接在一起,中间形成横刃)、两条对称的螺旋槽(用于容屑和排屑);导向部分磨有两条棱边(刃带),为了减少与加工孔壁的摩擦,棱边直径磨有 $(0.03 \sim 0.12)/100$ 的倒锥量,从而形成了副偏角 κ'_r 。

麻花钻的两个刃瓣可以看作两把对称的车刀:螺旋槽的螺旋面为前面,与工件过渡表面(孔底)相对的端部两曲面为主后面,与工件的加工表面(孔壁)相对的两条棱边为副后面,螺旋槽与主后面的两条交线为主切削刃,棱边与螺旋槽的两条交线为副切削刃。麻花钻的横刃为两后面在钻芯处的交线。

麻花钻的主要几何参数有螺旋角 β 、顶角 2φ (主偏角 $\kappa_r \approx \varphi$)、横刃斜角 ψ 、直径、横刃长度等。由于标准麻花钻存在切削刃长、前角变化大(从外缘处的大约 $+30^\circ$ 逐渐减小到钻芯处的大约 -30°)、螺旋槽排屑不畅、横刃部分切削条件很差(横刃前角约为一 60°)等结构问题,生产中,为了提高钻孔的精度和效率,常将标准麻花钻按特定方式刃磨成群钻(见图 1-16)使用。群钻的基本特征为:三尖七刃锐当先,月牙弧槽分两边,一侧外刃开屑槽,横刃磨得低窄尖。

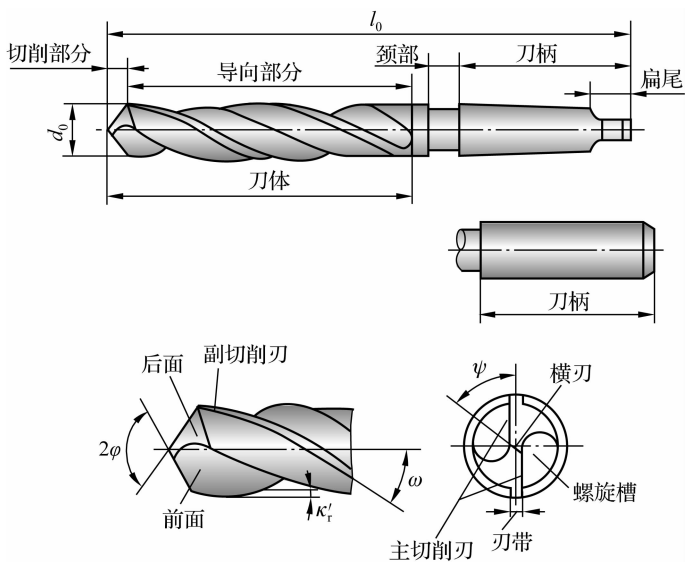


图 1-15 标准高速钢麻花钻的结构

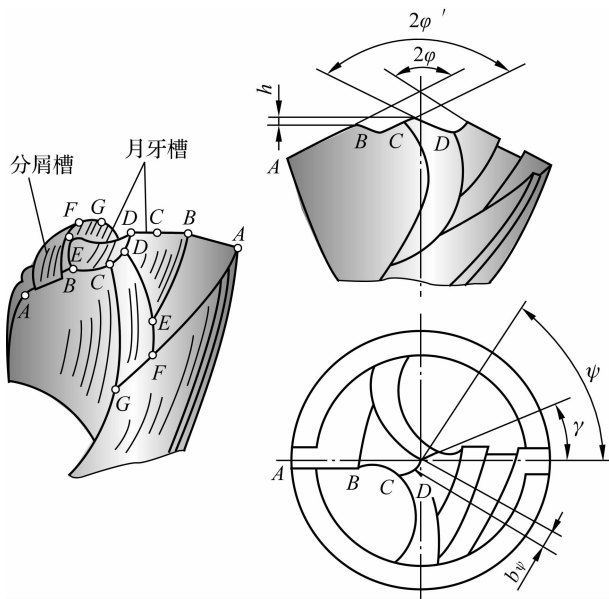


图 1-16 中型标准群钻

(2)中心钻。中心钻(见图 1-17)用于加工轴类工件的中心孔。钻孔时,先打中心孔,也有利于钻头的导向,可防止钻偏。

(3)深孔钻。深孔钻是专门用于钻削深孔(长径比 ≥ 5)的钻头。为解决深孔加工中的断屑、排屑、冷却润滑和导向等问题,人们先后开发了外排屑深孔钻、内排屑深孔钻、喷吸钻和套料钻等多种深孔钻。图 1-18 所示为用于加工枪管的外排屑深孔钻(常称为枪钻)的工作原理。



图 1-17 中 心 钻

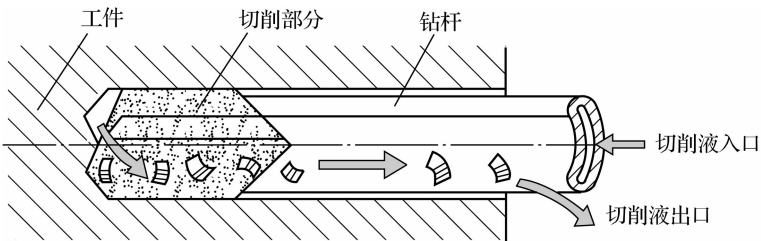


图 1-18 外排屑深孔钻的工作原理

(4)扩孔钻。扩孔钻常用于铰或磨前的预加工以及毛坯孔的扩大,其扩孔效率和精度均比麻花钻的高。扩孔钻常见的结构形式有高速钢整体式、镶齿套式和镶硬质合金可转位式,如图 1-19 所示。

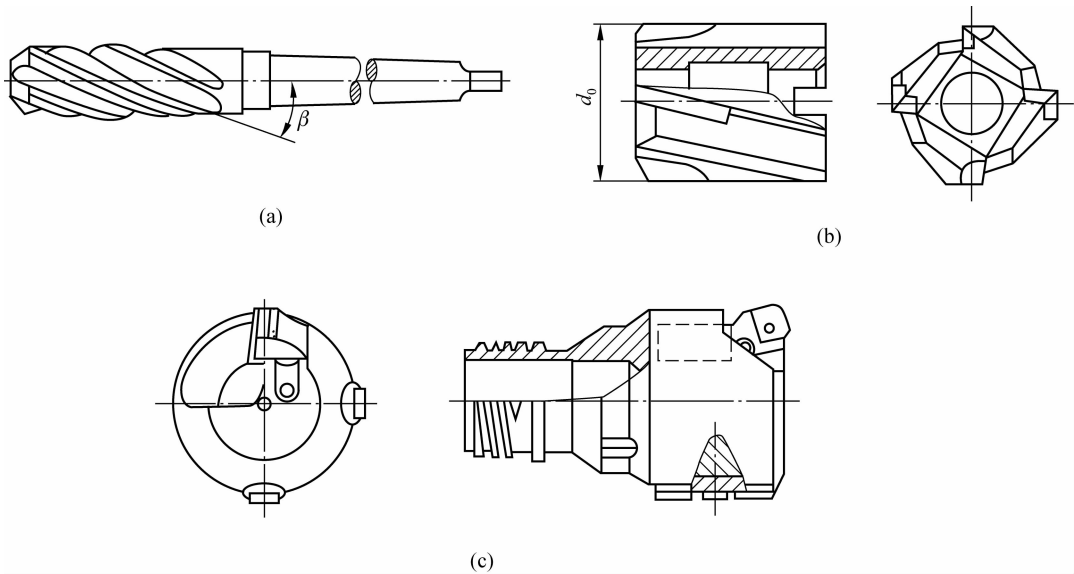


图 1-19 扩 孔 钻

(a)高速钢整体式; (b)镶齿套式; (c)镶硬质合金可转位式

(5)铰刀。铰刀是精加工刀具,加工精度可达 IT7~IT6,加工表面粗糙度 Ra 值可达 $1.6\sim0.4\ \mu\text{m}$ 。图 1-20 所示为几种常用铰刀,其中图 1-20(a)、图 1-20(b)所示为手用铰刀,图 1-20(c)、图 1-20(d)所示为机用铰刀,图 1-20(e)所示为两把一套的锥度铰刀。

(6)镗刀。镗刀多用于箱体孔的粗、精加工,一般分为单刃镗刀和多刃镗刀两大类。结构简单的单刃镗刀如图 1-21 所示。

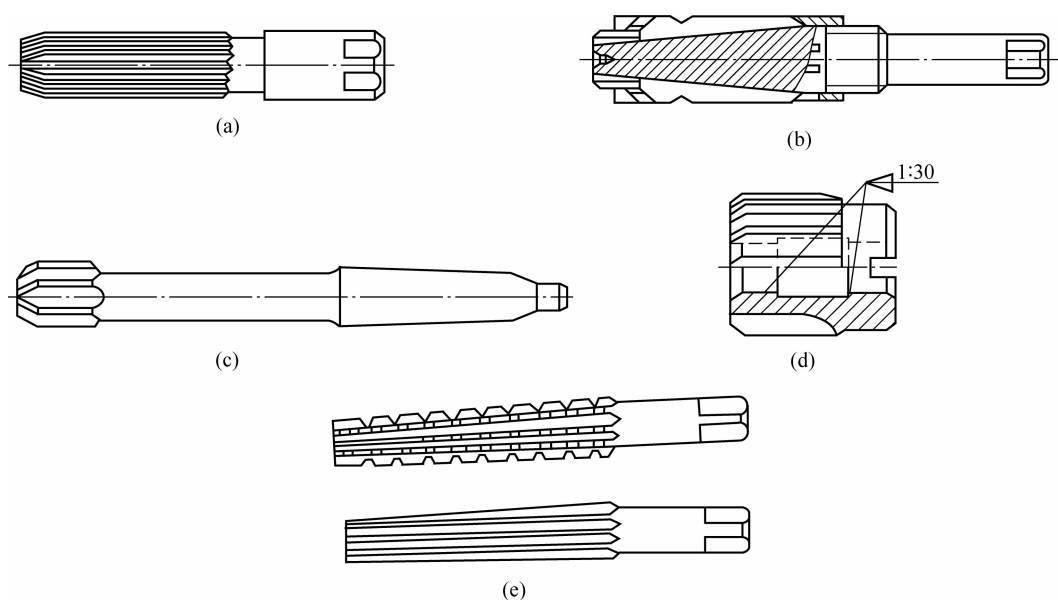


图 1-20 几种常用铰刀

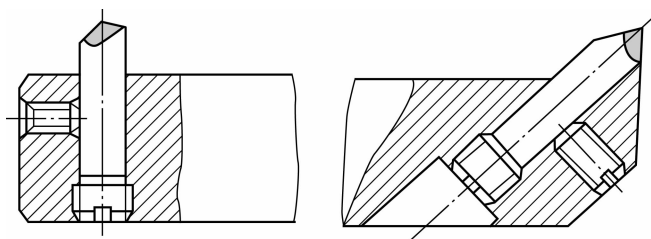


图 1-21 单刃镗刀

3) 铣刀

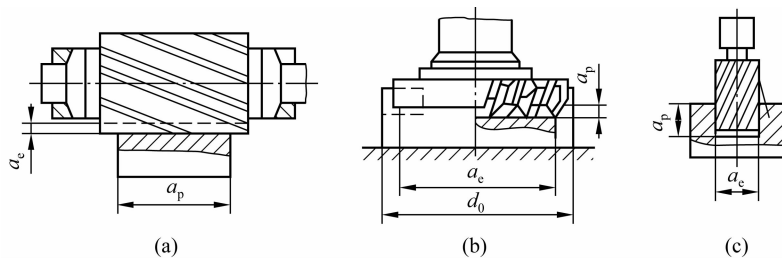
铣刀是一种应用广泛的多刃回转刀具,其种类很多。其按用途可分为以下几种。

(1)加工平面用的铣刀,如圆柱平面铣刀[见图 1-22(a)]、面铣刀[见图 1-22(b)]等。

(2)加工沟槽用的铣刀,如立铣刀[见图 1-22(c)]、两面刃或三面刃铣刀[见图 1-22(d)、图 1-22(e)]、锯片铣刀[见图 1-22(f)]、T 形槽铣刀[见图 1-22(g)]和角度铣刀 [见图 1-22(h)]。

(3)加工成形表面用的铣刀,如凸半圆和凹半圆铣刀[见图 1-22(i)、图 1-22(j)]以及加工其他复杂成形表面用的铣刀[见图 1-22(k)~图 1-22(n)]。

铣削的生产率一般较高,加工表面粗糙度值较大。



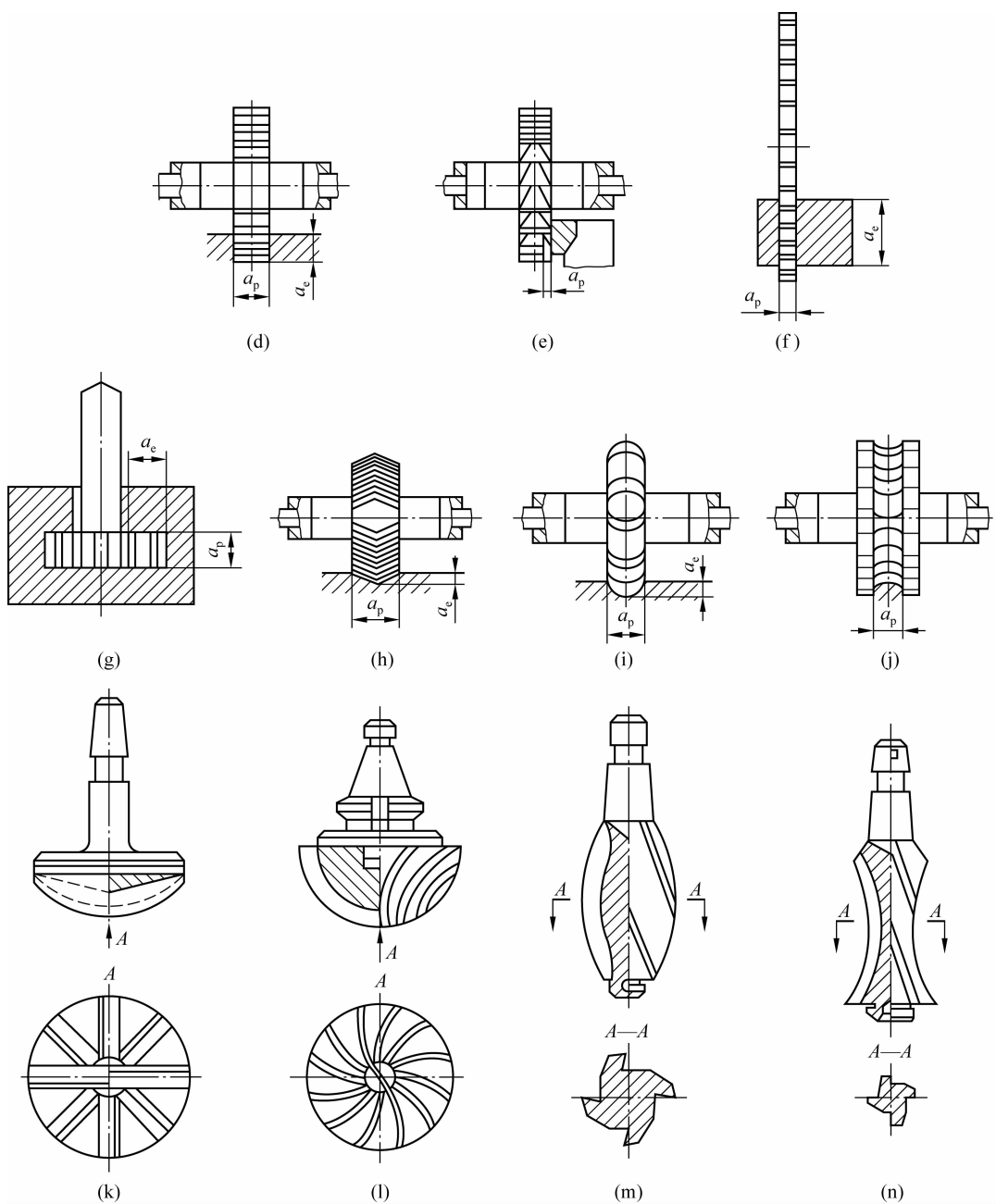


图 1-22 铣刀种类

(a)圆柱平面铣刀；(b)面铣刀；(c)立铣刀；(d)两面刃铣刀；(e)三面刃铣刀；(f)锯片铣刀；(g)T形槽铣刀；
(h)角度铣刀；(i)凸半圆铣刀；(j)凹半圆铣刀；(k)、(l)、(m)、(n)加工其他复杂成形表面用的铣刀

4) 拉刀

拉刀是一种加工精度和切削效率都比较高的多齿刀具,广泛应用于大批量生产中,可拉削加工各种内、外表面(见图 1-23)。拉刀按所加工工件表面的不同,可分为内拉刀和外拉刀两类。常用内拉刀和外拉刀的结构分别如图 1-24、图 1-25 所示。

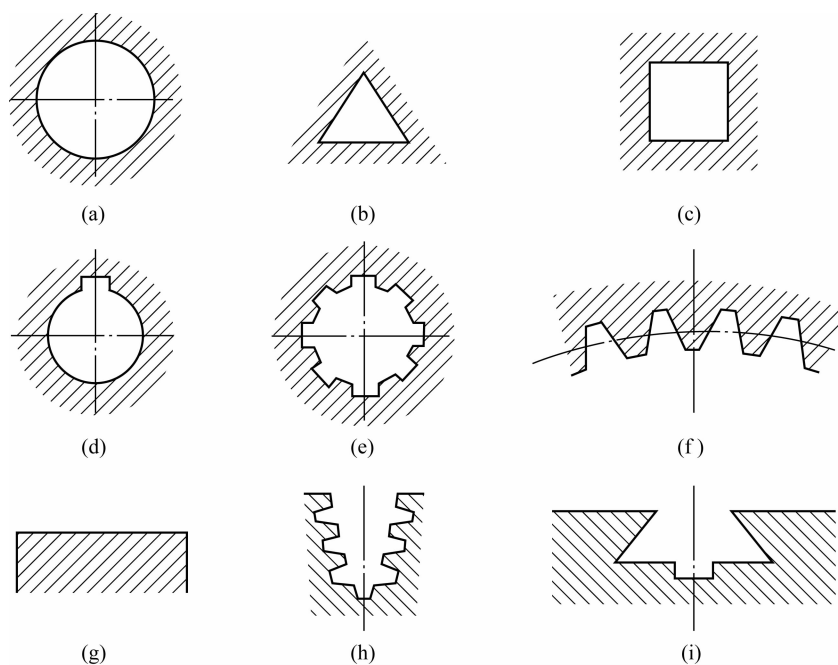


图 1-23 可拉削加工的各种内外表面举例

(a)圆孔；(b)三角形孔；(c)方孔；(d)键槽；(e)花键孔；
(f)内齿轮；(g)平面；(h)榫槽；(i)燕尾槽

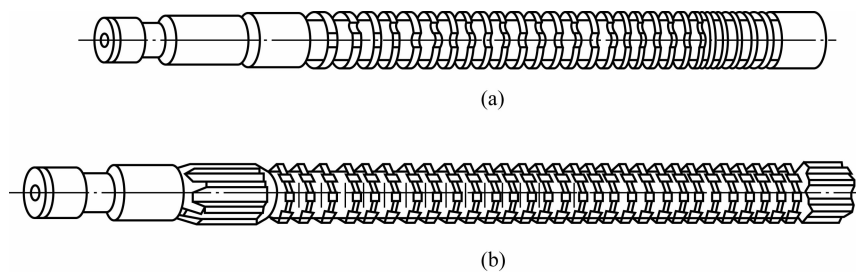


图 1-24 内 拉 刀

(a)圆孔拉刀；(b)花键拉刀

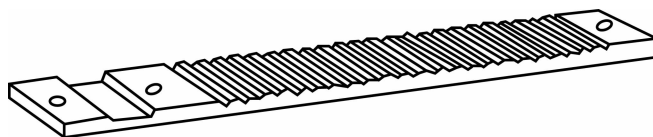


图 1-25 外 拉 刀

5) 螺纹刀具

螺纹可用切削法和滚压法进行加工。螺纹可在车床上车削加工(外螺纹),也可手动加工或在钻床上用丝锥加工(内螺纹)。图 1-26 所示为切削螺纹用的螺纹刀具。

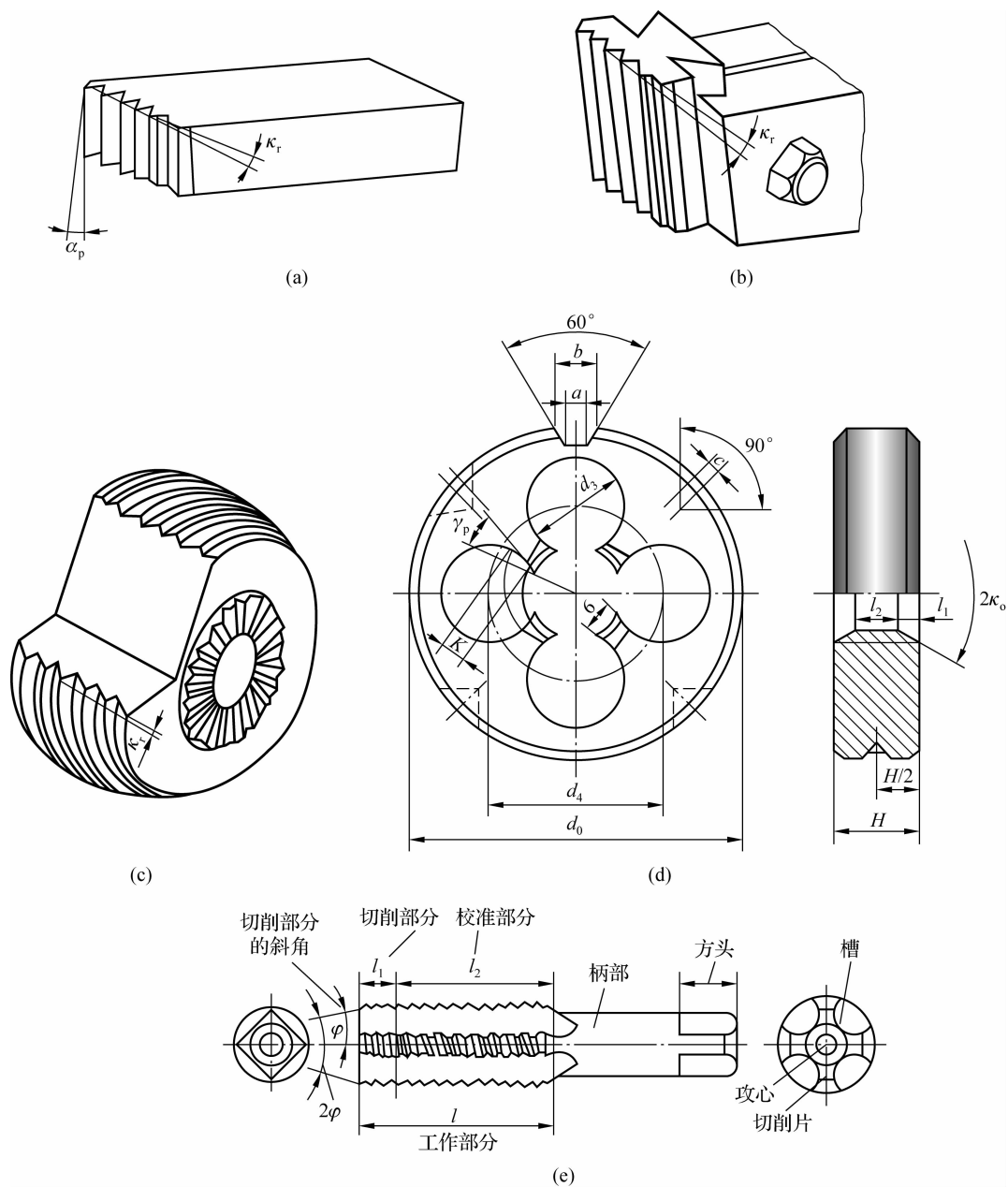


图 1-26 螺纹切削刀具

(a)平体螺纹梳刀；(b)棱体螺纹梳刀；(c)圆体螺纹梳刀；(d)板牙；(e)丝锥

6) 齿轮刀具

齿轮刀具是用于加工齿轮齿形的刀具,按工作原理可分为成形齿轮刀具和展成齿轮刀具。常用的成形齿轮刀具具有盘形齿轮铣刀(见图 1-27)和指形齿轮铣刀等。常用的展成齿轮刀具具有插齿刀(见图 1-28)、滚刀(见图 1-29)和剃齿刀(见图 1-30)等。其中,盘形直齿插齿刀用于加工普通直齿轮和大直径内齿轮;碗形直齿插齿刀用于加工塔形齿轮和双联齿轮;锥形直齿插齿刀用于加工直齿内齿轮。插齿刀也可用于加工斜齿轮、人字齿轮和齿条。

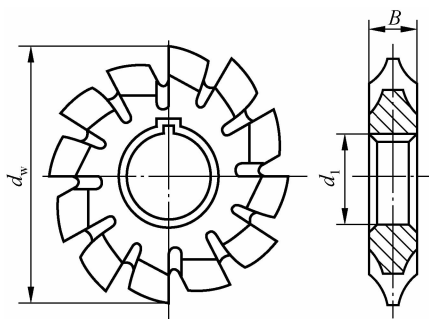


图 1-27 盘形齿轮铣刀

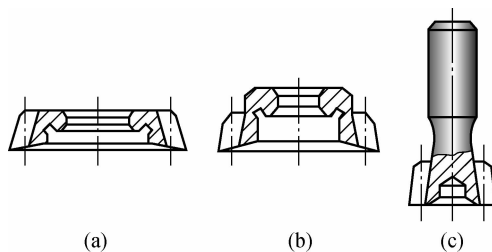


图 1-28 插 齿 刀

(a)盘形直齿插齿刀；(b)碗形直齿插齿刀；
(c)锥形直齿插齿刀

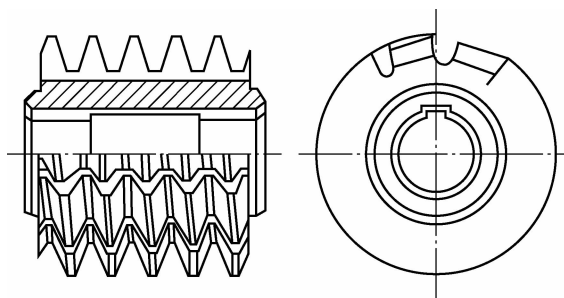


图 1-29 滚 刀

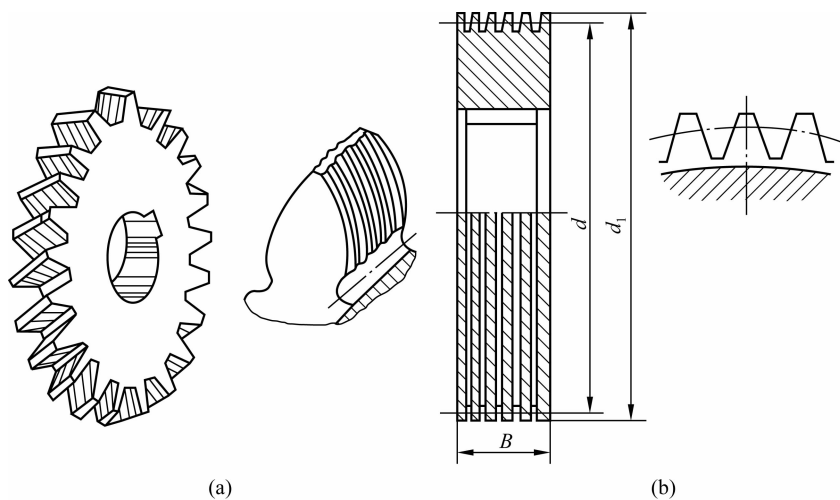


图 1-30 两种典型的剃齿刀

选用齿轮插齿刀和滚刀时,应注意以下几点。

- (1) 刀具基本参数(模数、齿形角、齿顶高系数等)应与被加工齿轮相同。
- (2) 刀具精度等级应与被加工齿轮要求的精度等级相当。
- (3) 刀具旋向应尽可能与被加工齿轮的旋向相同。滚切直齿轮时,一般用左旋滚刀。

1.3 刀具材料

为了完成切削,除了要求刀具具有合理的角度和适当的结构外,刀具的材料是保证刀具完成切削功能的重要基础。在切削过程中,刀具在强切削力和高温下工作,同时与切屑和工件表面都产生剧烈的摩擦,因此工作条件极为恶劣。为使刀具具有良好的切削能力,必须选用合适的材料。刀具材料对加工质量、生产率和加工成本影响极大。

1.3.1 刀具材料应具备的性能

刀具材料应满足以下基本要求。

- (1)高的硬度。刀具材料的硬度必须高于工件的硬度,以便刀具切入工件。在常温下刀具材料的硬度一般应该在 60 HRC 以上。
 - (2)高的耐磨性。耐磨性即抵抗磨损的能力。一般情况下,刀具材料硬度越高,耐磨性越好。
 - (3)高的耐热性。耐热性指刀具在高温下仍能保持硬度、强度、韧性和耐磨性的能力。
 - (4)足够的强度和韧性。只有具备足够的强度和韧性,刀具才能承受切削力和切削时产生的振动,以防脆性断裂和崩刃。
 - (5)良好的工艺性。为便于刀具本身的制造,刀具材料还应具有一定的工艺性能,如切削性能、磨削性能、焊接性能及热处理性能等。
 - (6)良好的热物理性能和耐热冲击性能。要求刀具的导热性要好,不会因受到大的热冲击产生刀具内部裂纹而导致刀具断裂。
- 应该指出,上述要求中有些是相互矛盾的,如硬度越高、耐磨性越好的材料的韧性和抗破损能力就越差,耐热性好的材料韧性也较差。实际工作中,应根据具体的切削对象和条件选择最合适的刀具材料。
- 在切削加工中用到的刀具材料有碳素工具钢、合金工具钢、高速钢、硬质合金、陶瓷、立方氮化硼(cubic boron nitride,CBN)、金刚石等。各种刀具材料的特性如表 1-1 所示。



微课
刀具材料

表 1-1 常用刀具材料的特性

种类	牌 号	硬 度	维持切削性能的最高温度/℃	抗弯强度 /GPa	工 艺 性 能	用 途
碳素工具钢	T8A、 T10A、 T12A	63~65 HRC (81~83 HRA)	200~250	2.2	可冷热加工成形,工艺性能良好,磨削性好,需热处理	只用于手动刀具,如手动丝锥、板牙、铰刀、锯条、锉刀等
合金工具钢	9CrSi、 CrWMn 等	63~66 HRC (81~83 HRA)	300~400	2.4		只用于手动或低速机动刀具,如丝锥、板牙、拉刀等

(续表)

种类	牌 号	硬 度	维持切削性能的最高温度/℃	抗弯强度/GPa	工 艺 性 能	用 途
高速钢	W18Cr4V、 W6Mo5Cr4V2Al、 W10Mo4Cr4V3Al	63~70 HRC (82~87 HRA)	600~650	2.5~4	可冷热加工成形，工艺性能好，需热处理，磨削性好，但高钒类高速钢磨削性较差	用于各种刀具，特别是形状较复杂的刀具，如钻头、铣刀、拉刀、齿轮刀具、丝锥、板牙、刨刀等
硬质合金	钨钴类： YG3、YG6、 YG8； 钨钴钛类： YT5、YT15、 YT30	89~94 HRA	800~1 000	0.9~2.45	压制烧结后使用，不能冷热加工，多镶片使用，不需要热处理	车刀刀头大部分采用硬质合金，铣刀、钻头、滚刀、丝锥等也可镶硬质合金刀片使用。钨钴类刀片加工铸铁、有色金属；钨钴钛类刀片加工碳素钢、合金钢、淬硬钢等
陶瓷材料		91~95 HRA	>1 200	0.45~0.8		多用于车刀，性脆，适用于连续切削
立方氮化硼		8 000~ 9 000 HV	1 400~ 1 500	0.3	压制烧结后使用，可用金刚石砂轮磨削	用于硬度、强度较高材料的精加工，在空气中达1 300 ℃时仍保持稳定
金刚石		10 000 HV	700~800	0.21~0.49	用天然金刚石砂轮刃磨极困难	用于有色金属的高精度、低粗糙度值切削，700~800 ℃时易碳化

1.3.2 常用刀具材料

常用的刀具材料主要有碳素工具钢、合金工具钢、高速钢和硬质合金。

1. 碳素工具钢与合金工具钢

碳素工具钢是含碳量最高的优质钢(碳的质量分数为0.7%~1.2%)，如 T10A。碳素

工具钢淬火后具有较高的硬度,而且价格低廉。但这种材料的耐热性较差,当温度达到 200 ℃ 时即失去它原有的硬度,并且淬火时容易产生变形和裂纹。

合金工具钢是在碳素工具钢中加入少量的 Cr、W、Mn、Si 等合金元素形成的刀具材料,如 9CrSi。由于合金元素的加入,与碳素工具钢相比,其热处理变形有所减小,耐热性也有所改善。

这两种刀具材料因其耐热性都比较差,所以常用于制造手动刀具和一些形状较简单的低速机动刀具,如锉刀、锯条、铰刀等。

2. 高速钢

高速钢又称锋钢或风钢,是含有较多 W、Cr、V 合金元素的高合金工具钢,如 W18Cr4V。与碳素工具钢和合金工具钢相比,高速钢具有较高的耐热性,温度达 600 ℃ 时仍能正常切削,其许用切削速度为 30~50 m/min,是碳素工具钢的 5~6 倍,而且它的强度、韧性和工艺性都较好,可广泛用于制造中速切削及形状复杂的刀具,如麻花钻、铣刀、拉刀、各种齿轮加工刀具。

为了提高高速钢的硬度和改善耐磨性,常采用如下措施。

(1)在高速钢中增添新的元素。如我国制成的铝高速钢中增添了铝元素,其硬度达 70 HRC,切削加工时能耐超过 600 ℃ 的高温,被称为高性能高速钢或超高速钢。

(2)粉末冶金法制造。用粉末冶金法制造的高速钢称为粉末冶金高速钢,它可消除碳化物的偏析并细化晶粒,提高材料的硬度,改善材料的韧性,并减小热处理变形,适用于制造各种高精度刀具。

3. 硬质合金

硬质合金是以高硬度、高熔点的金属碳化物(如 WC、TiC)为基体,以金属 Co、Ni 等为黏结剂,用粉末冶金方法制成的一种合金。其硬度为 74~82 HRC,切削加工时能耐 800~1 000 ℃ 的高温,耐磨性、耐热性好,许用切削速度是高速钢的 6 倍,但强度比高速钢的低,韧性比高速钢的差,工艺性差。硬质合金常用于制造形状简单的高速切削刀片,经焊接或机械夹固在车刀、刨刀、面铣刀、钻头 etc 刀体(刀杆)上使用。

切削工具用硬质合金牌号按使用领域不同分为 P、M、K、N、S、H 六大类,各个类别为满足不同的使用要求,以及根据材料耐磨性和韧性的不同,又可分为若干组,具体见表 1-2。

表 1-2 硬质合金的分类

组 别		基 本 成 分	适 用 领 域
类 别	分 组 号		
P	01	主要以 WC、TiC 为基体,以 Co(Ni+Mo、Ni+Co)作为黏结剂的合金/涂层合金	主要用于长切屑材料的加工,如钢、铸钢、长切屑可锻铸铁等的加工
	10		
	20		
	30		
M	01	主要以 WC 为基体,以 Co 作为黏结剂,添加少量 TiC(TaC、NbC)的合金/涂层合金	主要用于不锈钢、铸钢、锰钢、可锻铸铁合金钢、合金铸铁等的加工
	10		
	20		
	30		

(续表)

组 别		基 本 成 分	适 用 领 域
类 别	分 组 号		
K	01	主要以 WC 为基体,以 Co 作为黏结剂,或添加少量 TaC、NbC 的合金/涂层合金	主要用于短切屑材料的加工,如铸铁、冷硬铸铁、短切屑可锻铸铁、灰铸铁等的加工
	10		
	20		
	30		
	40		
N	01	主要以 WC 为基体,以 Co 作为黏结剂,或添加少量 TaC、NbC 或 CrC 的合金/涂层合金	主要用于有色金属、非金属材料的加工,如铝、铁、塑料、木材等的加工
	10		
	20		
	30		
S	01	主要以 WC 为基体,以 Co 作为黏结剂,或添加少量 TaC、NbC 或 TiC 的合金/涂层合金	主要用于耐热和优质合金材料的加工,如含镍、钴、钛各类合金材料的加工
	10		
	20		
	30		
H	01	主要以 WC 为基体,以 Co 作为黏结剂,或添加少量 TaC、NbC 或 TiC 的合金/涂层合金	主要用于硬切削材料的加工,如淬硬钢、冷硬铸铁等材料的加工
	10		
	20		
	30		

为了克服常用硬质合金强度低、韧性差、脆性大、易崩刃的缺点,常采用如下措施改善其性能。

- (1)调整化学成分,使硬质合金既有高的硬度又有良好的韧性。
- (2)细化合金的晶粒,提高硬度与抗弯强度。

1.3.3 新型刀具材料

随着高硬度难加工材料的出现,对刀具材料提出了更高的要求,这就推动了刀具新材料的不断开发。这里介绍三种——陶瓷、金刚石和立方氮化硼,后两者属于超硬材料。

1. 陶瓷

陶瓷是以氧化铝(Al_2O_3)或氮化硅(Si_3N_4)等为主要成分,经压制成形后烧结而成的刀具材料。陶瓷的硬度高、化学稳定性好、耐氧化,所以被广泛用于高速切削加工中。但由于其强度低、韧性差,长期以来主要用于精加工。

与传统硬质合金刀具相比,陶瓷刀具具有以下优点。

- (1)可加工硬度高达 65 HRC 的高硬度难加工材料。
- (2)可进行扒荒粗车及铣、刨等大冲击间断切削。
- (3)刀具寿命可延长几倍甚至几十倍。

(4)切削效率提高 3~10 倍,可实现以车、铣代磨。

2. 金刚石

金刚石是碳的同素异形体,是自然界已经发现的最硬材料,显微硬度达到 10 000 HV。一般有天然金刚石和人造金刚石两种,其中天然金刚石质地较脆,容易沿晶体的解理面破裂,导致大块崩刃,且价格昂贵,因此往往被人造聚晶金刚石(常称为人造金刚石)代替。

人造金刚石是以石墨为原料,通过合金触媒的作用,在高温高压下烧结而成的。它有如下特点。

(1)硬度极高,耐磨性极好,在加工高硬度材料时,人造金刚石刀具的寿命是硬质合金刀具的 10~100 倍,甚至几百倍。

(2)摩擦系数低。人造金刚石刀具与一些有色金属之间的摩擦系数约为硬质合金刀具的一半。

(3)切削刃非常锋利,可用于超薄切削和超精密加工。

(4)导热性能好,导热系数为硬质合金的 1.5~9 倍。

(5)热膨胀系数小。人造金刚石的热膨胀系数比硬质合金的小,约为高速钢的 1/10。

但人造金刚石的热稳定性差,使用温度不得超过 700~800 °C,特别是它与铁元素的化学亲和力很强,因此不宜用来加工钢铁件,多用于有色金属及其合金和一些非金属材料的加工,是目前超精密切削加工中的最主要刀具。

3. 立方氮化硼

立方氮化硼(CBN)是由六方氮化硼和触媒在高温高压下合成的,是继人造金刚石问世后出现的又一种新型高新技术产品。它具有很高的硬度、很好的热稳定性和化学惰性以及良好的透红外性和较宽的禁带宽度等优异性能,其硬度仅次于金刚石,但热稳定性远高于金刚石,可承受 1 200 °C 以上的切削温度,且对铁系金属元素有较大的化学稳定性,在高温下(1 200~1 300 °C)不会发生化学反应。

立方氮化硼磨具的磨削性能十分优异,不仅能胜任难磨材料的加工,提高生产率,还能有效地提高工件的磨削质量。由于 CBN 具有优于其他刀具材料的特性,因此人们一开始就试图将其应用于切削加工,但单品 CBN 的颗粒较小,很难制成刀具,且 CBN 烧结性很差,难以制成较大的 CBN 烧结体,直到 20 世纪 70 年代,苏联、中国、美国、英国等国家才相继研制成功作为切削刀具的 CBN 烧结体——聚晶立方氮化硼(PCBN)。从此,PCBN 以它优越的切削性能应用于切削加工的各个领域,尤其在高硬度材料、难加工材料的切削加工中更是独树一帜。目前应用广泛的是有黏结剂的 PCBN 刀具复合片,根据添加的黏结剂比例不同,其硬度特性也不同,黏结剂含量越高,硬度就越低,其韧性就越好。

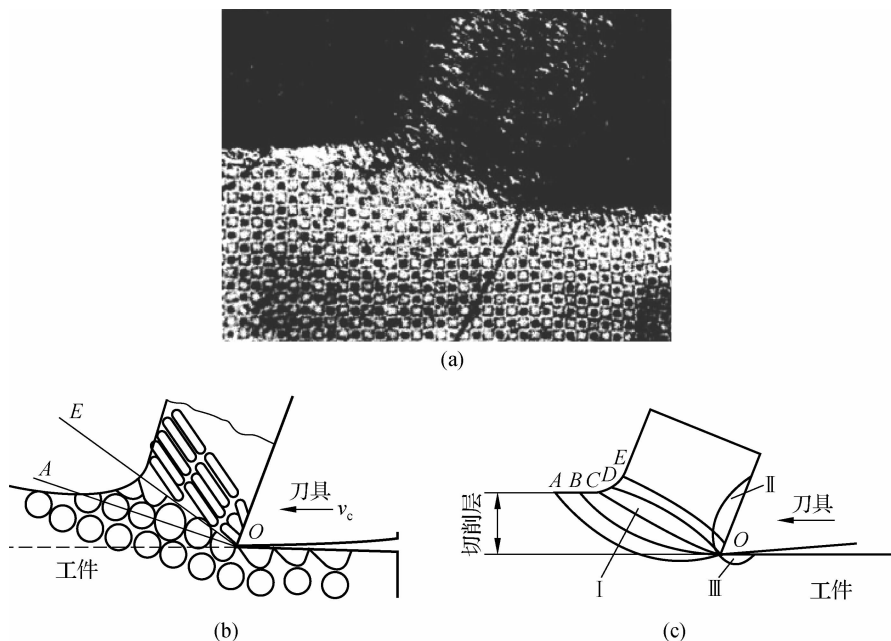
1.4 金属切削过程与现象

金属切削过程是指刀具与工件相互作用形成切屑的过程,在这一过程中会出现许多物理现象,如切削力、切削热、积屑瘤、刀具磨损和加工硬化等。因此,研究切削的过程与现象对切削加工的发展和进步、保证加工质量、降低生产成本、提高生产效率等,都有着重要意义。

1.4.1 切削过程

1. 切屑形成过程

对塑性金属进行切削时,切屑的形成过程就是切削层金属的变形过程。图 1-31(a)所示为低速直角自由切削工件侧面时,用显微镜观察得到的切削层金属变形的情况。



微课
切屑

图 1-31 切屑的形成过程

(a)金属切削层变形情况;(b)切削过程晶粒变形情况;(c)切削过程3个变形区

工件受到刀具的挤压后,如图 1-31(b)所示,切削层金属在始滑移面 OA (始滑移面是指晶体材料在受力作用下,首先发生滑移变形的那个晶面)以左发生弹性变形,越靠近 OA 面,弹性变形越大。在 OA 面上,应力达到材料的屈服点 σ_s ,则发生塑性变形,产生滑移现象(滑移是晶体材料在外力作用下发生塑性变形的最主要方式之一,其本质是晶体内部原子面沿特定方向发生的相对滑动)。随着刀具的连续移动,原来处于始滑移面上的金属不断向刀具靠拢,应力和变形也逐渐加大。在终滑移面 OE 上,应力和变形达到最大值。越过 OE 面,切削层金属将脱离工件基体,沿着前面流出而形成切屑,完成切离阶段。经过塑性变形的金属,其晶粒沿大致相同的方向伸长。可见,金属切削过程实质是一种挤压过程,这一过程中的许多物理现象,都是由切削过程中的变形和摩擦引起的。

2. 切屑变形区

切削塑性金属材料时,刀具与工件接触的区域可分为 3 个变形区,如图 1-31(c)所示。

(1)第一变形区。 OA 与 OE 之间是切削层的塑性变形区 I,称为第一变形区或基本变形区。基本变形区的变形量最大,常用它来说明切削过程的变形情况。

(2)第二变形区。切屑与前面摩擦的区域 II 称为第二变形区或摩擦变形区。切屑形成后与前面之间存在压力,所以沿前面流出时必然有很大的摩擦,因而使切屑底层又一次产生

塑性变形。

(3)第三变形区。工件已加工表面与后面接触的区域Ⅲ称为第三变形区或加工表面变形区。

这三个变形区汇集在切削刃附近,此处的应力比较集中而且复杂,金属的被切削层就在此处与工件基体发生分离,大部分变成切屑,很小一部分留在已加工表面上。

1.4.2 切屑的类型及其控制

1. 切屑类型

由于工件材料不同,切削过程中的变形程度也就不同,因而产生的切屑种类也就多种多样,如图 1-32 所示。

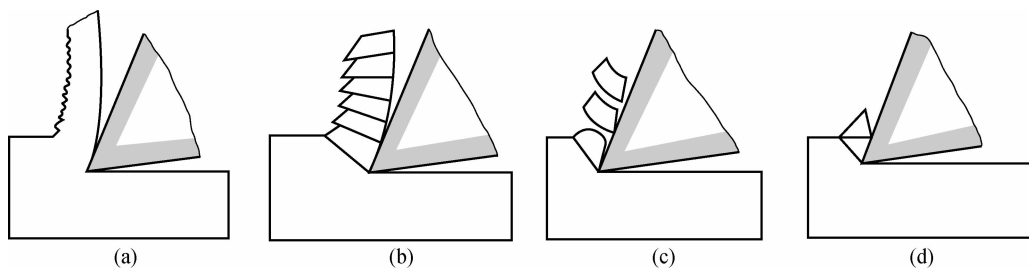


图 1-32 切屑类型

(a)带状切屑; (b)挤裂切屑; (c)单元切屑; (d)崩碎切屑

(1)带状切屑[见图 1-32(a)]。带状切屑是最常见的一种切屑,它的内表面是光滑的,外表面是毛茸的。如用显微镜观察,在外表面上也可看到剪切面的条纹,但每个单元很薄,肉眼看来大体上是平整的。加工塑性金属材料,当切削厚度较小、切削速度较高、刀具前角较大时,一般得到这类切屑。它的切削过程平稳,切削力波动较小,已加工表面的表面粗糙度值较小。

(2)挤裂切屑[见图 1-32(b)]。挤裂切屑与带状切屑的不同之处在于表面呈锯齿形,内表面有时有裂纹。这类切屑之所以呈锯齿形,是因为它的第一变形区较宽,在剪切滑移过程中滑移量较大。由滑移变形所产生的加工硬化使剪切力增加,在局部地方达到材料的破裂强度。挤裂切屑大多在切削速度较低、切削厚度较大、刀具前角较小时产生。

(3)单元切屑[见图 1-32(c)]。在挤裂切屑的剪切面上,若裂纹扩展到整个面,则整个单元被切离,成为梯形的单元切屑。

以上三种切屑只有在加工塑性材料时才可能得到。其中,带状切屑的切削过程最平稳,切削力波动最小,单元切屑的切削力波动最大。在生产中最常见的是带状切屑,有时得到挤裂切屑,单元切屑则很少见。假如改变生成挤裂切屑的条件,如进一步减小刀具前角,降低切削速度,或加大切削厚度,就可以得到单元切屑;反之,则可以得到带状切屑。这说明切屑的形态是可以随切削条件而转化的。掌握了变化规律,就可以控制切屑的形态和尺寸,以达到卷屑和断屑的目的。

(4)崩碎切屑[见图 1-32(d)]。加工脆性材料时才会得到崩碎切屑。这种切屑的形状是不规则的,加工表面是凹凸不平的。从切削过程来看,崩碎切屑在破裂前变形很小,和塑性

材料的切屑形成机理也不同,它的脆断主要是由于材料所受应力超过了它的抗拉强度。加工脆硬材料,如高硅铸铁、白口铸铁等,特别是当切削厚度较大时常得到这种切屑。由于它的切削过程很不平稳,容易破坏刀具,也有损于机床,已加工表面又粗糙,因此在生产中应力求避免。避免产生崩碎切屑的方法是减小切削厚度,使切屑呈针状或片状;同时适当提高切削速度,以改善工件材料的塑性。

2. 切屑控制

除了以上四种典型切屑,加工现场获得的切屑形状是多种多样的。在现代切削加工中,切削速度与金属切除率达到了很高的水平,切削条件很恶劣,常常产生大量“不可接受”的切屑。这类切屑或拉伤工件的已加工表面,使表面粗糙度恶化;或划伤机床,卡在机床运动副之间;或造成刀具的早期破损;有时甚至影响操作者的安全。特别对于数控机床、生产自动线及柔性制造系统,如不能进行有效的切屑控制,轻则限制了机床能力的发挥,重则使生产无法正常进行。所谓切屑控制(又称切屑处理,工厂中一般简称为断屑),是指在切削加工中采取适当的措施来控制切屑的卷曲、流出与折断,以形成“可接受”的良好屑形。从切屑控制的角度出发,国际标准化组织(ISO)制定了切屑分类标准,如图 1-33 所示。

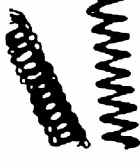
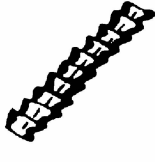
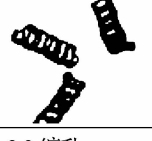
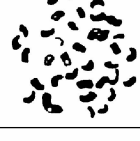
1 带状切屑	2 管形切屑	3 盘螺旋形切屑	4 环形螺旋切屑	5 锥形螺旋切屑	6 弧形切屑	7 单元切屑
1.1 长 	2.1 长 	3.1 平 	4.1 长 	5.1 长 	6.1 连接 	
1.2 短 	2.2 短 	3.2 锥 	4.2 短 	5.2 短 	6.2 松散 	
1.3 缠乱 	2.3 缠乱 		4.3 缠乱 	5.3 缠乱 		

图 1-33 ISO 切屑分类标准

衡量切屑可控性的主要标准是:不妨碍正常的加工,即不缠绕在工件、刀具上,不飞溅到机床运动部件中;不影响操作者的安全;易于清理、存放和搬运。ISO 切屑分类法中的 3. 1、2. 2、3. 2、4. 2、5. 2、6. 2 类切屑单位质量所占空间小,易于处理,属于良好的屑形。对于不同的加工场合,如不同的机床、刀具或者不同的被加工材料,有相应的可接受屑形。因而,在进行切屑控制时,要针对不同情况采取适应的措施,以得到相应的可接受的良好屑形。

在实际加工中,应用最广的切屑控制措施是使用可转位刀具,并且在前面磨出断屑槽

或使用压块式断屑器。

1.4.3 切削过程中的积屑瘤现象

在切削速度不高而又能形成连续切屑的情况下,加工一般钢料或其他塑性材料时,常常在刀具前面黏着一块剖面有时呈三角状的硬块。它的硬度很高,通常是工件材料的 2~3 倍,在比较稳定的状态下,能够代替切削刃进行切削。这块冷焊在前面上的金属称为积屑瘤或刀瘤。积屑瘤剖面如图 1-34 所示。

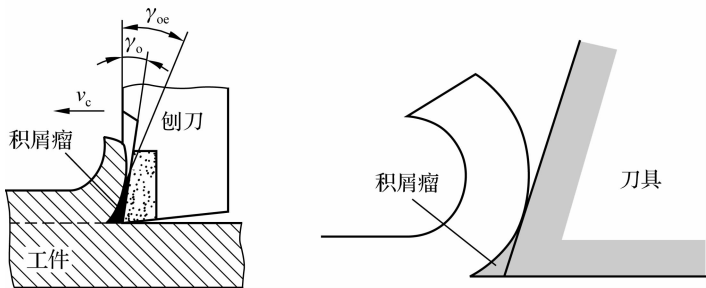


图 1-34 积屑瘤



微课
积屑瘤

积屑瘤的产生会引起刀具实际角度的变化,如可增大前角,有时可延长刀具寿命等。但是积屑瘤是不稳定的,增大到一定程度后会碎裂,这样容易嵌入已加工表面内,增大了工件表面的表面粗糙度值。积屑瘤在加工过程中是不可控的,只能通过改变切削条件防止其产生。

1.5 切削力与切削功率

切削过程中工件作用在刀具上的切削抗力称为切削力。切削力直接决定着切削热的产生,并影响刀具磨损、破损、刀具耐用度、加工精度和已加工表面质量。在生产中,切削力又是计算切削功率,制定切削用量,监控切削状态,设计和使用机床、刀具、夹具的必要依据。因此,研究切削力的规律和计算方法,将有利于分析切削机理,并对生产实际有重要的实用意义。

1.5.1 切削力的来源

金属切削加工时,刀具切入工件,使被加工材料发生变形并成为切屑所需的力,称为切削力。由前述切削变形的分析可知,切削力来源于以下三个方面(见图 1-35)。

- (1)克服被加工材料弹性变形的抗力。
- (2)克服被加工材料塑性变形的抗力。
- (3)克服切屑与前面的摩擦力和刀具后面与过渡表面和已加工表面之间的摩擦力。

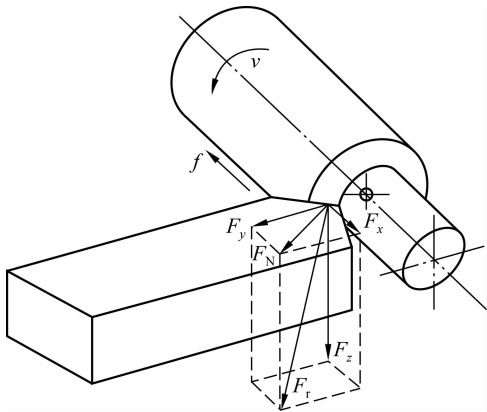


图 1-35 切削合力和分力

1.5.2 切削合力与切削功率

切削各力形成作用在刀具上的合力 F_r 。为了实际应用, F_r 可分解为相互垂直的 F_x 、 F_y 和 F_z 三个分力。

在车削时:

F_z 为(主)切削力或切向力。它的方向与过渡表面相切并与基面垂直。 F_z 是计算车刀强度、设计机床主轴系统、确定机床功率所必需的。

F_x 为进给力、轴向力。它是处于基面内并与工件轴线平行与进给方向相反的力。 F_x 是设计进给机构、计算车刀进给功率所必需的。

F_y 为切深抗力或背向力、径向力、吃刀力。它是处于基面内并与工件轴线垂直的力。 F_y 是计算工件挠度、机床零件和车刀强度的依据。工件在切削过程中产生的振动往往与 F_y 有关。

由图 1-35 可以看出:

$$F_r = \sqrt{F_z^2 + F_N^2} = \sqrt{F_z^2 + F_x^2 + F_y^2}$$

根据实验, 当 $\kappa_r = 45^\circ$ 、 $\lambda_s = 0^\circ$ 和 $\gamma_o \approx 15^\circ$ 时, F_z 、 F_x 和 F_y 之间的关系为

$$F_y = (0.15 \sim 0.7) F_z$$

$$F_x = (0.1 \sim 0.6) F_z$$

由此可得

$$F_r = (1.02 \sim 1.36) F_z$$

随车刀材料、车刀几何参数、切削用量、工件材料和车刀磨损情况的不同, F_x 、 F_y 和 F_z 之间的比例可在较大范围内变化。

消耗在切削过程中的功率称为切削功率 P_m 。切削功率为力 F_z 和 F_x 所消耗的功率之和, 因 F_y 方向没有位移, 所以不消耗功率。于是

$$P_m = \left(F_z v_c + \frac{F_x n_w f}{1\,000} \right) \times 10^{-3}$$

式中, P_m 为切削功率(kW); F_z 为切削力(N); v_c 为切削速度(m/s); F_x 为进给力(N); n_w 为工件转速(r/s); f 为进给量(mm/r)。

上式中, $\frac{F_x n_w f}{1\,000}$ 是消耗在进给运动中的功率, 它相对于 F_z 所消耗的功率很小, 一般为 F_z 所消耗功率的 1%~2%, 因此可以略去不计, 则

$$P_m = F_z v_c \times 10^{-3}$$

在求得切削功率后, 还可以计算出主运动电动机的功率 P_E , 但需要考虑机床的传动效率 η , 即有

$$P_E \geq \frac{P_m}{\eta}$$

一般 η 取 0.75~0.85, 较大值适用于新机床, 较小值适用于旧机床。



微课
切削力

1.5.3 切削力的计算

1. 指数公式法

在金属切削中广泛应用指数公式计算切削力。常用的指数公式的形式为

$$\begin{aligned} F_z &= C_{F_z} a_p^{x_{F_z}} f^{y_{F_z}} v^{n_{F_z}} K_{F_z} \\ F_y &= C_{F_y} a_p^{x_{F_y}} f^{y_{F_y}} v^{n_{F_y}} K_{F_y} \\ F_x &= C_{F_x} a_p^{x_{F_x}} f^{y_{F_x}} v^{n_{F_x}} K_{F_x} \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中, C_{F_z} 、 C_{F_y} 、 C_{F_x} 为与工件材料、刀具材料有关的影响系数,其大小与实验条件有关; x_{F_z} 、 x_{F_y} 、 x_{F_x} 为背吃刀量 a_p 对切削各分力的影响指数; y_{F_z} 、 y_{F_y} 、 y_{F_x} 为进给量 f 对切削各分力的影响指数; n_{F_z} 、 n_{F_y} 、 n_{F_x} 为切削速度 v 对切削各分力的影响指数; K_{F_z} 、 K_{F_y} 、 K_{F_x} 为实验条件与计算条件不同时的修正系数。

式(1-1)中的系数 C_{F_z} 、 C_{F_y} 、 C_{F_x} 和指数 x_{F_z} 、 y_{F_z} 、 n_{F_z} 、 x_{F_y} 、 y_{F_y} 、 n_{F_y} 、 x_{F_x} 、 y_{F_x} 、 n_{F_x} 可在切削用量手册中查得。手册中的数值是在特定的刀具几何参数(包括几何角度和刀尖圆弧半径等)下针对不同的加工材料、刀具材料和加工形式,由大量的实验结果处理而来的。表 1-3 列出了计算车削切削力的指数公式中的系数和指数,其中对于硬质合金刀具, $\kappa_r = 45^\circ$, $\gamma_o = 10^\circ$, $\lambda_s = 0^\circ$;对于高速钢刀具, $\kappa_r = 45^\circ$, $\gamma_o = 20^\circ \sim 25^\circ$, 刀尖圆弧半径 $r = 1.0 \text{ mm}$ 。当刀具的几何参数及其他条件与上述不符时,可用相应的修正系数对各个因素进行修正,对于 F_z 、 F_y 和 F_x ,所有相应修正系数的乘积就是 K_{F_z} 、 K_{F_y} 和 K_{F_x} 。各个修正系数的值和计算公式可由切削用量手册查得。

由表 1-3 可见,除车螺纹外,切削力 F_z 中切削速度 v 的指数 n_{F_z} 几乎全为 0,说明切削速度对切削力影响不明显(经验公式中反映不出来)。这一点在后面还要进行说明。对于最常见的外圆纵车、横车或镗孔, $x_{F_z} = 1.0$, $y_{F_z} = 0.75$,这是一组典型的值,不光计算切削力有用,还可用于分析切削中的一些现象。

由此可以容易地估算某种具体加工条件下的切削力和切削功率。例如,用某硬质合金车刀外圆纵车 $\sigma_b = 0.637 \text{ GPa}$ 的结构钢,车刀几何参数为 $\kappa_r = 45^\circ$, $\gamma_o = 10^\circ$, $\lambda_s = 0^\circ$,切削用量为 $a_p = 4 \text{ mm}$, $f = 0.4 \text{ mm/r}$, $v = 1.7 \text{ m/s}$ 。把由表 1-3 查出的系数和指数代入式(1-1)(由于所给条件与表 1-3 条件相同,故 $K_{F_z} = K_{F_y} = K_{F_x} = 1$)得

$$F_z = C_{F_z} a_p^{x_{F_z}} f^{y_{F_z}} v^{n_{F_z}} K_{F_z} = 1433 \times 4^{1.0} \times 0.4^{0.75} \times 1.7^{-0.15} \times 1 \text{ N} = 2662.5 \text{ N}$$

$$F_y = C_{F_y} a_p^{x_{F_y}} f^{y_{F_y}} v^{n_{F_y}} K_{F_y} = 572 \times 4^{0.9} \times 0.4^{0.6} \times 1.7^{-0.3} \times 1 \text{ N} = 980.3 \text{ N}$$

$$F_x = C_{F_x} a_p^{x_{F_x}} f^{y_{F_x}} v^{n_{F_x}} K_{F_x} = 561 \times 4^{1.0} \times 0.4^{0.5} \times 1.7^{-0.4} \times 1 \text{ N} = 1147.8 \text{ N}$$

切削功率 P_m 为

$$P_m = F_z v \times 10^{-3} = 2662.5 \times 1.7 \times 10^{-3} \text{ kW} \approx 4.5 \text{ kW}$$

2. 单位切削力法

单位切削力 k_c 是指单位切削面积上的切削力,可表示为

$$k_c = \frac{F_z}{A_c} = \frac{F_z}{a_p f} = \frac{F_z}{a_c a_w} \quad (1-2)$$

式中, k_c 为单位切削力 (N/mm^2); A_c 为切削面积 (mm^2); a_p 为背吃刀量 (mm); f 为进给量 (mm/r); a_c 为切削厚度 (mm); a_w 为切削宽度 (mm)。

表 1-3 计算车削切削力的指数公式中的系数和指数

加工材料	刀具材料	加工形式	公式中的系数及指数											
			切削力 F_z			背向力 F_y			进给力 F_x			C_{F_z}	nF_z	yF_z
			C_{F_z}	xF_z	yF_z	C_{F_y}	xF_y	yF_y	C_{F_x}	xF_x	yF_x			
结构钢及铸钢 ($\sigma_b=0.637\text{ GPa}$)	硬质合金	外圆纵车、横车及镗孔	1 433	1.0	0.75	-0.15	572	0.9	0.6	-0.3	561	1.0	0.5	-0.4
		切槽及切断	3 600	0.72	0.8	0	1 393	0.73	0.67	0	-	-	-	-
		车螺纹	23 879	-	1.7	0.71	-	-	-	-	-	-	-	-
高速钢	高速钢	外圆纵车、横车及镗孔	1 766	1.0	0.75	0	922	0.9	0.75	0	530	1.2	0.65	0
		切槽及切断	2 178	1.0	1.0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
		车螺纹	1 874	1.0	0.75	0	-	-	-	-	-	-	-	-
不锈钢 1Cr18Ni9Ti (141 HBW)	硬质合金	外圆纵车、横车及镗孔	2 001	1.0	0.75	0	-	-	-	-	-	-	-	-
灰铸铁 (190 HBW)	硬质合金	外圆纵车、横车及镗孔	903	1.0	0.75	0	530	0.9	0.75	0	451	1.0	0.4	0
		切螺纹	29 013	-	1.8	0.82	-	-	-	-	-	-	-	-
		外圆纵车、横车及镗孔	1 118	1.0	0.75	0	1 167	0.9	0.75	0	500	1.2	0.65	0
可锻铸铁 (150 HBW)	高速钢	切槽及切断	1 550	1.0	1.0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
		外圆纵车、横车及镗孔	795	1.0	0.75	0	422	0.9	0.75	0	373	1.0	0.4	0
		切槽及切断	981	1.0	0.75	0	863	0.9	0.75	0	392	1.2	0.65	0
中等硬度不均匀质铜合金(120 HBW)	高速钢	切槽及切断	1 364	1.0	1.0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
		外圆纵车、横车及镗孔	540	1.0	0.66	0	-	-	-	-	-	-	-	-
		切槽及切断	736	1.0	1.0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
铝及铝硅合金	高速钢	外圆纵车、横车及镗孔	392	1.0	0.75	0	-	-	-	-	-	-	-	-
		切槽及切断	491	1.0	1.0	0	-	-	-	-	-	-	-	-