

高等学校机械工程类专业系列规划教材

机械制造技术

基础

JIXIE ZHIZAO
JISHU JICHU

主编 唐火红 丁 志 杨 沁
主审 张崇高



合肥工业大学出版社
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

高等学校机械工程类专业系列规划教材

机械制造技术基础

主 编 唐火红 丁 志 杨 沁

主 审 张崇高

合肥工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

机械制造技术基础/唐火红,丁志,杨沁主编. —合肥:合肥工业大学出版社,2015.12
ISBN 978-7-5650-2542-6

I. ①机… II. ①唐…②丁…③杨… III. ①机械制造工艺—高等学校—教材
IV. ①TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 287160 号

机械制造技术基础

唐火红 丁 志 杨 沁 主编

责任编辑 汤礼广

出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2015 年 12 月第 1 版
地 址	合肥市屯溪路 193 号	印 次	2016 年 1 月第 1 次印刷
邮 编	230009	开 本	787 毫米×1092 毫米 1/16
电 话	理工编辑部:0551—62903087 市场营销部:0551—62903198	印 张	23.25
网 址	www.hfutpress.com.cn	字 数	518 千字
E-mail	hfutpress@163.com	印 刷	合肥现代印务有限公司
		发 行	全国新华书店

ISBN 978-7-5650-2542-6

定价: 49.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换。



前 言

制造技术具有极其悠久的历史,它伴随人类的生活而出现,并随着人类生产的发展而发展。人类社会在发展中不断创造新的产品、新的材料,同时对制造技术又提出了新的要求,从而促进了新的加工原理和新的加工方法的产生,使制造技术得以持续发展。制造技术的发展又促进了开发和制造新产品的能力,从而极大地丰富了人类社会的物质生活,推动了科学技术的发展。20 世纪以来,现代数学、系统论、控制论和信息论等理论和学科的创建与发展,新材料技术、数控技术、自动化技术和微电子技术的产生与发展从根本上改变了制造技术的状况,使之进入了自动、高效的现代化技术体系。

机械制造技术基础是机械工程类专业的一门主干技术基础课程,作为与该课程配套的教材,本书不仅要全面地反映机械制造技术的体系,要具有系统性、先进性和实用性,而且通过本教材的学习,要让学生了解金属切削过程的基础规律和各种加工方法的基本知识,能正确选择加工方法及机床、刀具和工艺装备,具有制订零件工艺规程的能力和了解保证装配精度的装配方法,初步具备分析和解决现场机械制造工艺问题的能力。因此,认真编写一本既好用又适用的本课程教材显得非常重要。

机械制造技术具有极强的实践性,即本课程的理论学习环节与相关的实验、实习和课程设计环节是密不可分的。因此在编写本教材时,编者充分考虑实验、实习和课程设计环节的需要,尽量做到让理论与实践紧密联系,目的是让学生在掌握机械制造专业的基本理论知识的同时,拥有系统的工程实践经历,培养学生工程技术实践能力和创新能力,为学生将来在机械工程领域内从事设计、制造和开发研究



工作打下坚实的基础。

本教材内容按 64 学时编写。教学时，建议机械类专业结合课程内容安排 24 学时的综合实验和 3 周机械制造工艺课程设计，同时在生产实习中了解各种机械加工方法和认识机床、刀具、夹具、量具等设备；近机械类专业结合课程内容可选做 6 学时实验。

本书由唐火红、丁志、杨沁担任主编，吴仲伟、柯庆镛、岳奎、常伟杰、张魁榜等参加编写。全书由合肥工业大学张崇高教授主审。

限于编者水平，本书的体系安排和内容选择恐有不当之处，恳请读者批评指正。

编 者



常用物理量的名称及符号

量的名称	符号	量的名称	符号
剪切角	ϕ	切深剖面	P_p
切削速度	v_c	前角	γ_o
进给速度	v_f	后角	α_o
合成切削运动速度	v_e	主偏角	κ_r
合成切削速度角	η	刃倾角	λ_s
进给量	f	副偏角	κ_r'
切削深度(背吃刀量)	a_p	副后角	α_o'
工件(或刀具)的转速	n	楔角	β_o
每齿进给量	a_f	刀尖角	ϵ_r
工件上待加工表面直径	d_w	余偏角	ψ_r
工件上已加工表面直径	d_m	法前角	γ_n
切削厚度	h_D	法后角	α_n
切削宽度	b_D	法楔角	β_n
切削层的面积	A_D	切深前角	γ_p
实际切削面积	A_{DE}	切深后角	α_p
残留面积	ΔA_D	切深楔角	β_p
金属切除率	Z_w	进给前角	γ_f
平均切削速度	v_{av}	进给后角	α_f
前刀面	A_f	进给楔角	β_f
主后刀面	A_a	工作基面	P_{re}
副后刀面	A_a'	工作切削平面	P_{sc}
主切削刃	S	工作前角	γ_{oe}
副切削刃	S'	工作后角	α_{oe}
基面	P_r	工作主偏角	κ_{re}
切削平面	P_s	工作副偏角	κ_{re}'
主剖面	P_o	摩擦角(F_n 与 F_r 之间的夹角)	β
法剖面	P_n	为剪切面的面积	A_s
进给剖面	P_f	为剪切面上的剪应力	τ



(续表)

量的名称	符号	量的名称	符号
前刀面上的法向力	F_n	最大利润制定刀具使用寿命	T_{pr}
前刀面上的摩擦力	F_f	基准不重合误差	Δ_{jb}
剪切面上的正压力	F_{ns}	基准位移误差	Δ_{jw}
剪切面上的剪切力	F_s	孔轴配合最小间隙	Δ_s
切削运动方向的分力	F_c	在受力方向上的变形	y
与切削运动方向垂直的切削分力	F_p	误差复映系数	ϵ
前刀面与切屑间的摩擦系数	μ	工件的热膨胀系数	α
切屑厚度压缩比 (称为变形系数)	Δ_b	热伸长量	ξ
切屑厚度	h_{ch}	工艺能力系数	C_p
切削层厚度	h_D	样本极差的上限	UCL
切屑长度	L_{ch}	样本极差的下限	LCL
切削层长度	L_c	工序总余量	Z_0
正应力	σ	工序余量	Z_i
过切深度	Δh_D	本工序的工序余量 (单边余量)	Z_b
前刀面上的平均正应力	σ_{av}	上工序留下的表面粗糙度值 (表面轮廓最大高度)	R_z
单位切削力	p	上工序的尺寸公差	T_a
切削功率	P_c	上工序留下的空间位置误差	E_a
机床电机的功率	P_E	本工序的装夹误差	ϵ_b
单位时间内产生的切削热	Q	基本尺寸	A
刀面接触区平均温度	θ	上偏差	ES
后刀面磨损量	VB	下偏差	EI
前刀面月牙洼磨损深度	KT	中间偏差	Δ
刀具的径向尺寸磨损量的允许极限值	NB	封闭环基本尺寸	A_0
刀具使用寿命或公差	T	增环基本尺寸	A_p
一个工序的生产时间	t_w	减环基本尺寸	A_q
切削加工基本时间	t_m	辅助时间	t_f
工序辅助时间	t_{ot}	布置工作地时间	t_b
一次换刀所需时间	t_{ct}	休息和生理需要时间	t_x
最大生产率刀具使用寿命	T_P	准备与终结时间	t_z
最低成本使用寿命	T_c		



目 录

第一章 切削加工基础	(1)
第一节 切削加工基本概念	(1)
第二节 刀具几何参数和刀具材料	(8)
第三节 切屑形成机理	(33)
第四节 切削力与切削功率	(43)
第五节 切削热与切削温度	(52)
第六节 刀具磨损、破损和使用寿命	(59)
第二章 切削加工方法与机床	(71)
第一节 工件表面及其形成方法	(71)
第二节 机床传动联系图和机床运动调整	(75)
第三节 金属切削机床的分类和型号编制	(77)
第四节 回转体表面加工方法	(82)
第五节 非回转体表面加工方法	(101)
第六节 磨削与光整加工	(118)
第三章 机床夹具设计	(130)
第一节 机床夹具概述	(130)
第二节 工件的定位原理与定位装置	(135)
第三节 工件的夹紧	(159)
第四节 典型机床夹具设计	(168)
第五节 机床夹具设计方法	(198)



第四章 机械加工质量	(202)
第一节 机械加工质量的概念	(202)
第二节 机械加工精度	(203)
第三节 加工误差的统计分析	(232)
第四节 机械加工表面质量	(243)
第五章 工艺规程设计	(257)
第一节 概述	(257)
第二节 零件工艺分析及毛坯的选择	(268)
第三节 机械加工工艺路线制订	(276)
第四节 工艺尺寸链	(292)
第五节 时间定额和提高生产率的工艺途径	(302)
第六节 工艺方案的经济分析	(306)
第七节 机械加工工艺路线设计实例	(309)
第八节 装配工艺规程设计	(325)
第九节 机械产品设计的装配工艺性评价	(342)
第六章 先进切削加工技术简介	(346)
第一节 现代加工技术的发展趋势	(347)
第二节 高速切削加工技术	(348)
第三节 精密与超精密切削加工技术	(354)
第四节 绿色干切削加工技术	(358)
参考文献	(361)



第一章 切削加工基础

第一节 切削加工基本概念

一、研究金属切削过程的意义和方法

1. 研究金属切削过程的意义

金属切削过程是指刀具从工件表面切除多余材料形成切屑并获得工件新表面的过程。切削过程中出现的许多物理现象,如切削力、切削热、刀具磨损和工件表面变质层等,都以切屑形成过程为基础,而切削过程中出现的积屑瘤、鳞刺、振动、卷屑与断屑等,都与切削变形过程有关,因此,研究金属切削过程对促进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。

切削加工过程中被切除的多余材料称为切屑。在不同的切削条件下切屑形成的机理不同,具有不同的切屑形态。在切削机理的研究过程中,基于解析的方式表达的切削模型是1937年由Pissspannen提出的卡片模型(如图1-1所示),此后发展为基于“剪切角 ϕ ”的种类繁多的各种切削模型。20世纪70年代由于计算机和数值计算技术的发展,有限元法被应用于切削过程的研究。基于有限元法的切削过程研究成为切削理论研究的热点之一。20世纪以来,随着人们对微观世界的认识,分子动力学也开始应用于切削过程的研究,即在原子量级上研究切削过程。

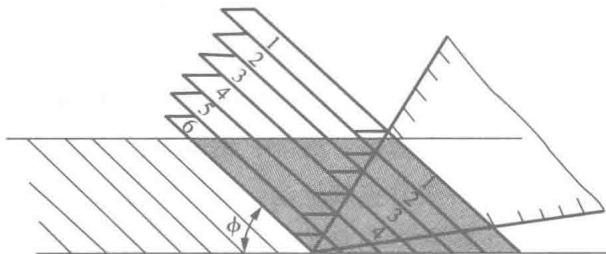


图 1-1 金属切削变形过程示意图

2. 研究金属切削过程的方法

(1) 侧面方格变形观察法

为了直观清晰地看到金属切削层各点的变形,在工件侧面作出细小的方格,察看切削过程中这些方格如何被扭曲,借以判断和认识切削层的塑性变形、切削层变为切屑的实际情况。



(2) 高频摄影法

利用带有显微镜头的高频摄影机,拍摄切削试件的侧面,可以得到一个完整的从切削变形开始至形成切屑的真实过程。常用的高频摄影机每秒可拍摄几百幅到几万幅以上。高频摄影机为研究高速切削时切削变形过程提供了可能性。

(3) 快速落刀法

利用一种叫作“快速落刀”装置的特殊刀架,在切削过程的某一瞬间使刀具以极快的速度突然脱离工件,把在某一切削条件下切屑层的变形情况“冻结”下来。落刀后从工件上锯下切削件根部,制成金相标本,用显微镜观察。

(4) 扫描电镜和透射电镜显微观察法

借助于扫描电镜和透射电镜,可以观察到金属晶粒内部的微观滑移情况,使我们能够用金属物理的观点理解金属切削变形过程及其现象。

(5) 光弹性和光塑性实验法

在实验观察金属切削变形过程的基础上,为了分析金属变形区的应力状态,对切削刃前方的金属进行弹性力学和塑性力学的研究和实验。

二、切削运动和切削用量

1. 切削运动和切削中的工件表面

(1) 切削运动

切削运动是指各种切削加工中形成工件表面的运动(如图1-2所示)。按照它们在切削过程中所起的作用,可分为主运动和进给运动两种,而这两种运动的向量和称为合成切削运动。所有切削运动的速度及方向都是相对于工件定义的。

① 主运动

主运动是由机床或手动提供的刀具与工件之间主要的相对运动,使刀具切削部分工件材料(被切削金属层)转变为切屑,从而形成工件的新表面。它是切削运动中最主要的运动。

车削时工件的回转运动是主运动;铣削时刀具的回转运动是主运动。此外,钻削和磨削时,钻头和砂轮的回转运动是主运动。主运动也可以是直线运动,如在刨削时,刀具或工作台的往复直线运动是主运动。主运动可由工件完成,如车削、龙门刨床上刨削;也可以由刀具完成,如铣削、牛头刨床上刨削、磨削、钻削等。通常,切削运动中主运动的速度较高,消耗的切削功率最大,一般是连续运动,且只能有一个。

主运动方向:刀具切削刃上选定点相对于工件的瞬时主运动方向。

切削速度 v_c : 刀具切削刃上选定点相对于工件的主运动的瞬时速度。

② 进给运动

进给运动是在切削运动中不断地将切削层投入切削,使切削工作得以持续下去的运动。一般来说,进给运动的速度较低,功率消耗也较少。其数量可以是一个,如钻削(钻头轴向进给);也可以是多个,如外圆磨削(轴向进给、圆周进给和径向进给)。可以是连续进行的,如钻孔、车外圆、铣平面等;也可以是断续进行的,如刨平面。进给运动可以

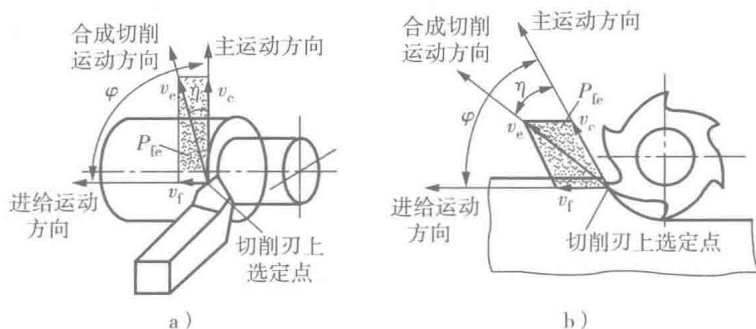


图 1-2 切削运动

是由工件完成的，如铣削、磨削等；也可以是由刀具完成的，如车削、钻削等。

进给运动方向：刀具切削刃上选定点相对于工件的瞬时进给方向。

进给速度 v_f ：刀具切削刃上选定点相对于工件的进给运动的瞬时速度。

总之，任何切削加工方法都必须有一个主运动，可以有一个或几个进给运动（亦可能没有进给运动，如拉床）。主运动和进给运动可以由工件或刀具分别完成，也可以由刀具单独完成（例如在钻床上钻孔或铰孔）。

③ 合成切削运动

合成切削运动是由主运动和进给运动合成的切削运动，车削和铣削时切削运动的合成和分解如图 1-2 所示。

合成切削运动方向：刀具切削刃上选定点相对于工件的瞬时合成切削运动方向。

合成切削运动速度 v_c ：刀具切削刃上选定点相对于工件合成切削运动的瞬时速度。

合成切削速度角 η ：主运动方向和合成切削运动方向之间的夹角。它在工作进给剖面内度量。

图 1-2 中 v_c 、 v_f 和 v_c 之间的关系为

$$v_c = v_c + v_f \quad \text{或} \quad v_c = v_c / \cos \eta \quad (1-1)$$

工件加工新表面的形成是靠刀具与工件之间的切削运动实现的。当进给运动连续进行时，主运动和进给运动的合成运动是实际切削运动。由于进给速度常常比主运动速度小得多，故常将主运动看成是合成切削运动，即 $v_c \approx v_c$ 。

(2) 切削中的工件表面

车削加工是一种最典型的切削加工方法。图 1-3 所示普通外圆车削加工的主运动是工件的回转；进给运动是刀具的直线移动，在主运动和进给运动的共同作用下，工件表面的一层金属连续地被车刀切下来并转变为切屑，从而加工出所需要的工件外圆新表面。在新表面的形成过程中，工件上有三个不断变化着的表面：待加工表面、过渡表面和已加工表面。

待加工表面：加工时即将被切除的表面。

已加工表面：已被切去多余金属而形成符合要求的工件新表面。



过渡表面（又称为加工表面）：加工时由刀具主切削刃正在切削的那个表面，它是待加工表面和已加工表面之间的过渡表面。

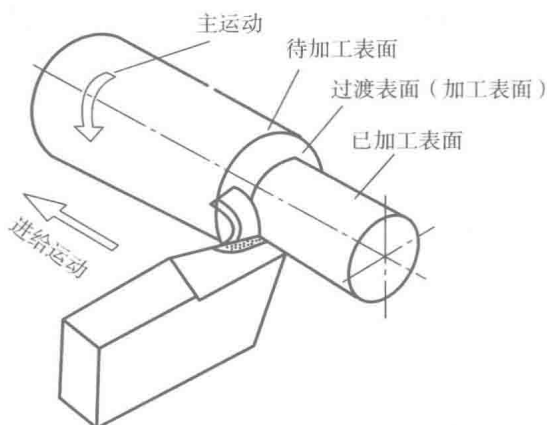


图 1-3 车外圆时的加工表面

在切削过程中，刀具切削刃相对于工件运动轨迹面，就是工件上的过渡表面和已加工表面，不同形状的刀具切削刃与不同的切削运动组合，即可形成各种工件表面，如图 1-4 所示。

2. 切削用量

切削用量是指切削速度 v_c 、进给量 f （或进给速度 v_f ）和切削深度 a_p （又称为背吃刀量），这三者被称为切削用量三要素。

（1）切削速度 v_c

刀具切削刃相对于工件的主运动速度称为切削速度。

计算切削速度时，应选取刀具切削刃或工件上速度最高的点进行计算。主运动为旋转运动时，切削速度由式（1-2）确定：

$$v_c = \frac{\pi d n}{1000} \quad (1-2)$$

式中： d ——工件（或刀具）的最大直径（mm）；

n ——工件（或刀具）的转速（r/s 或 r/min）。

目前在生产中，磨削速度的单位用 m/s（米/秒），其他加工的切削速度单位用 m/min（米/分）。

由于刀具切削刃上各点的回转半径不同（刀具的回转运动为主运动），或切削刃上各点对应的工件直径不同（工件的回转运动为主运动），因而切削速度也就不同。如外圆车削时用 d_w 代入公式计算待加工表面上的切削速度，内孔车削时用 d_m 代入公式计算已加工表面上的切削速度，其中 d_w 和 d_m 如图 1-4a 所示。钻削时计算钻头外径处的速度。

（2）进给量 f

工件或刀具转一周（或每往复一次），两者在进给运动方向上的相对位移量称为进给量 f ，其单位是 mm/r（或 mm/双行程）。对于铣刀、铰刀、拉刀等多齿刀具，还规定每刀齿进给量 a_f ，单位是 mm/z。进给速度 v_f 是单位时间内的进给方向位移量，单位是



mm/s (或 mm/min), 进给速度、进给量和每齿进给量之间的关系可表示为

$$v_f = n f = n z a_f \quad (1-3)$$

式中: n ——工件 (或刀具) 转速 (r/s 或 r/min);

f ——进给量 (mm/r 或 mm/双行程);

z ——刀具齿数;

a_f ——每齿进给量 (mm/z)。

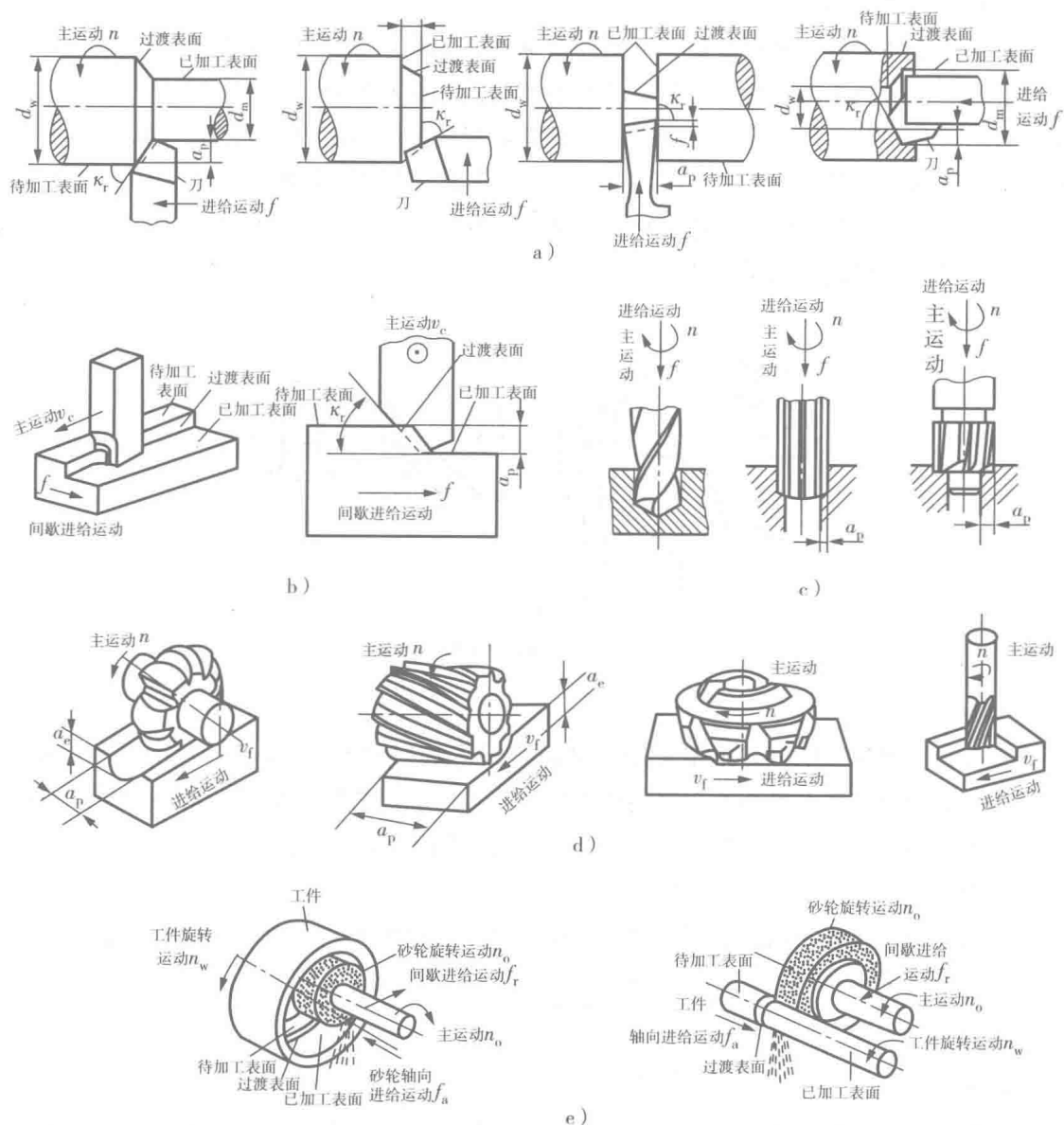


图 1-4 各种切削加工表面与切削运动

a) 车削; b) 刨削; c) 钻削; d) 铣削; e) 磨削

(3) 切削深度 a_p

刀具切削刃与工件的接触长度在同时垂直于主运动和进给运动的方向所形成的平面上



的投影值称为切削深度（或背吃刀量）。对于车削和刨削来说，切削深度就是工件已加工表面和待加工表面间的垂直距离，如图 1-4 所示。切削深度由式 1-4 确定

$$a_p = \frac{d_w - d_m}{2} \quad (1-4)$$

式中： d_w ——工件上待加工表面直径（mm）；

d_m ——工件上已加工表面直径（mm）。

三、切削层参数

各种切削加工的切削层参数，可用外圆纵车来说明，如图 1-5 所示。车刀正在切削着的这一层金属叫作切削层，切削层的大小和形状决定了车刀切削部分所承受的负荷大小及切屑的形状和尺寸。垂直于切削速度 v_c 的切削层的剖面形状为一平行四边形，但不论切削层的形状如何，其底边尺寸是 f ，高总是 a_p ，因此，切削用量的两个要素 f 和 a_p ，又称为切削层的工艺参数。同时不论何种切削加工，真正能够说明切削机理的是切削层的厚度和宽度，所以要讨论切削层及其参数。

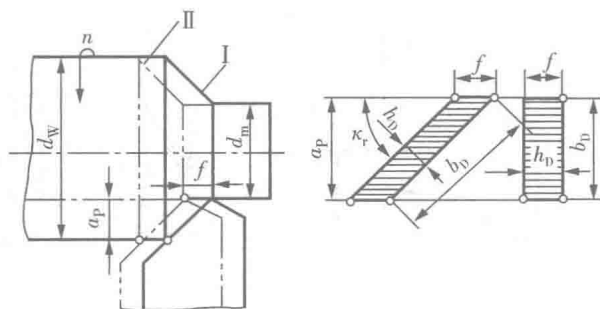


图 1-5 车外圆时切削层参数

1. 切削层

在各种切削加工中，刀具相对于工件沿进给方向每移动 f （mm/r）或 a_f （mm/齿）之后，一个切削刃正在切削的金属层称为切削层。切削层的尺寸称为切削层参数。切削层的剖面形状和尺寸通常在垂直于切削速度 v_c 的剖面中观察和度量。

2. 切削厚度

切削层中，垂直于过渡表面度量的切削层尺寸（如图 1-5 所示），称为切削厚度，以 h_D 表示。在外圆纵车时：

$$h_D = f \sin \kappa_r \quad (1-5)$$

3. 切削宽度

切削层中，沿过渡表面度量的切削层尺寸（图 1-5），称为切削宽度，以 b_D 表示。外圆纵车时：

$$b_D = a_p / \sin \kappa_r \quad (1-6)$$

在 f 和 a_p 一定的条件下， κ_r 越大，切削厚度 h_D 也越大，但切削宽度 b_D 越小； κ_r 越小



时, h_D 越小, b_D 越大; 当 $\kappa_r = 90^\circ$ 时, $h_D = f$, $b_D = \alpha_p$ 。

对于曲线形主切削刃, 切削层各点的切削厚度互不相等 (如图 1-6 所示)。

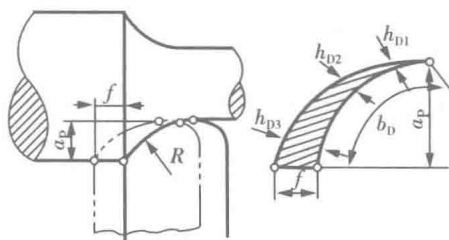


图 1-6 曲线切削刃加工时的 h_D 和 b_D

4. 切削层面积

切削层面积以 A_D 表示。其计算公式为

$$A_D = h_D b_D \quad (1-7)$$

对于车削来说, 不论切削刃形状如何, 切削面积均为

$$A_D = h_D b_D = f \alpha_p \quad (1-8)$$

以上计算出的面积为名义切削面积 (如图 1-7 所示中的 $ABCD$)。实际切削面积 A_{DE} 等于名义切削面积 A_D 减去残留面积 ΔA_D , 即

$$A_{DE} = A_D - \Delta A_D \quad (1-9)$$

残留面积 ΔA_D 是指切削刃从位置 I 移至位置 II 后, 残留在已加工表面上的不平部分的剖面面积 (如图 1-7 所示中的 ABE)。

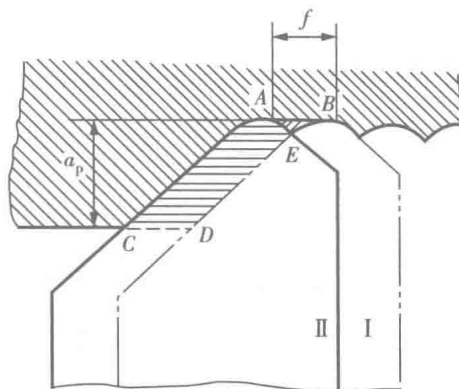


图 1-7 切削面积和残留面积

四、金属切除率

金属切除率是指刀具在单位时间内从工件上切除金属的体积, 它是衡量金属切削加工效率的指标之一。金属切除率 Z_w 可由切削面积 A_D 和平均切削速度 v_{av} 求出, 即

$$Z_w = 1000 A_D v_{av} \quad (1-10)$$



对于车削, $v_{av} = \frac{\pi n(d_w + d_m)}{2000}$ (m/s 或 m/min), 所以

$$Z_w = 1000 A_D v_{av} = 1000 f a_p v_{av} = \frac{\pi n f a_p (d_w + d_m)}{2} = \pi n f a_p (d_m \pm a_p)$$

式中, 车外圆取正号, 车孔取负号。一般 a_p 比 d_m 小很多, 所以车削金属切除率可用下式近似计算:

$$Z_w \approx \pi n f a_p d_m \quad (1-11)$$

对于铣削,

$$Z_w = v_f a_p a_e = a_f a_p a_e z n \quad (1-12)$$

对于钻孔,

$$Z_w = \frac{\pi n f d_m^2}{4} \quad (1-13)$$

对于扩孔,

$$Z_w = \frac{\pi n f (d_m^2 - d_w^2)}{4} \quad (1-14)$$

其他加工方法的金属切除率同理可以求出。

上述各式中, 各变量的单位分别是: 金属切除率 Z_w 为 mm^3/s 或 mm^3/min ; 刀具或工件转速 n 为 r/s , r/min ; 切削深度 a_p 、铣削接触弧深度 a_e 为 mm ; 每转进给量 f 为 mm/r ; 进给速度 v_f 为 mm/min ; 每齿进给量 a_f 为 mm/z ; 工件已加工直径 d_m 为 mm ; 工件待加工直径 d_w 为 mm 。

第二节 刀具几何参数和刀具材料

一、刀具结构和刀具角度

1. 刀具的组成及切削部分的结构

金属切削刀具的种类很多, 结构也多种多样, 都是由刀柄和切削部分组成。刀柄是刀具安装到机床刀架 (或刀杆) 上用以保证正确位置和传递动力的基础件。切削部分用以实现切除加工余量 (切削层), 各种刀具切削部分的几何形状与参数都有共性, 即切削部分的形状总是近似地以外圆车刀切削部分的几何形状为基本形态。

如图 1-8 所示, 刀具切削部分 (又称刀头) 由前刀面、后刀面、副后刀面、主切削刃、副切削刃和刀尖所组成。

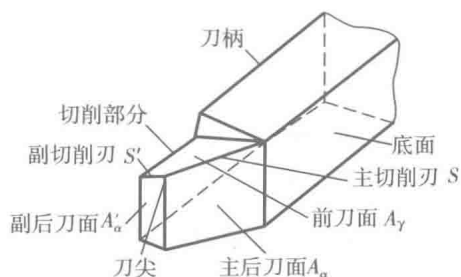


图 1-8 外圆车刀的结构要素