

中华人民共和国机械工业部统编
机械工人技术培训教材

铣 工 工 艺 学

(中 级 本)

科学 普及 出版社

本书是中华人民共和国机械工业部统编的机械工人技术培训教材。它根据原一机部《工人技术等级标准》和教学大纲编写的。本书着重叙述凸轮、离合器、直齿锥齿轮、蜗杆蜗轮、链轮、球面和椭圆柱面、刀具开齿和模具的铣削方法，并介绍了铣削原理、铣床夹具、工艺规程等知识。此外，还简要介绍了典型铣床的精度检验方法、万能工具铣床和龙门铣床的结构及维护保养知识。为了便于复习巩固，每章末附有复习题。

本书是4~6级铣工技术培训教材，也可供有关技术人员和工人学习参考。

本书由张章福、吉广镜、康世荣、胡家富同志编写，由李永顺、侯慧人、周炳章同志参加审稿。

中华人民共和国机械工业部统编
机械工人技术培训教材

铣工工艺学

(中级本)

责任编辑 罗秀文

科学普及出版社出版(北京海淀区白石桥路32号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

89920部队印刷厂印刷

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 20 1/2 插页: 1 字数: 482千字

1984年10月第1版 1984年10月第1次印刷

印数: 1—60,500册 定价: 2.95元

统一书号: 15051.1135 本社书号: 0646

目 录

第一章 铣削原理	1
第一节 基本定义	1
第二节 金属切削过程	9
第三节 铣削力和铣削功率	13
第四节 切削热	20
第五节 铣刀的磨损和耐用度	23
第六节 铣刀切削部分几何参数的合理选择	28
第七节 铣削用量的合理选择	31
第八节 铣刀的改进	35
复习题	40
第二章 凸轮铣削	42
第一节 铣等速圆盘凸轮	43
第二节 铣等速圆柱凸轮	53
第三节 等速凸轮的检验与质量分析	62
复习题	64
第三章 离合器铣削	65
第一节 离合器的工艺要求	65
第二节 离合器铣削时的装夹	67
第三节 铣矩形齿离合器	68
第四节 铣尖齿和锯齿形齿离合器	71
第五节 铣梯形齿离合器	74
第六节 铣螺旋齿离合器	78
第七节 离合器的检验和质量分析	80
复习题	82
第四章 直齿圆锥齿轮铣削	83
第一节 直齿圆锥齿轮各部名称和尺寸计算	83
第二节 铣标准直齿圆锥齿轮	87
第三节 直齿圆锥齿轮测量和质量分析	95
复习题	97
第五章 蜗杆蜗轮铣削	98
第一节 蜗杆蜗轮各部名称和尺寸计算	98
第二节 铣蜗杆	101
第三节 铣蜗轮	102
第四节 蜗杆蜗轮测量和质量分析	114
复习题	116
第六章 链轮铣削	117
第一节 链轮各部名称和尺寸计算	117

第二节 铣链轮	121
复习题	131
第七章 球面和椭圆柱面铣削	132
第一节 铣球面	132
第二节 铣椭圆柱面	144
复习题	146
第八章 刀具开齿	147
第一节 圆柱面直齿刀具开齿	147
第二节 圆柱面螺旋齿刀具开齿	156
第三节 端面齿开齿	164
第四节 锥面直齿刀具开齿	169
第五节 刀具开齿的检验与质量分析	174
复习题	177
第九章 模具铣削	179
第一节 铣模具型腔的方法	180
第二节 模具型腔的检验和质量分析	198
复习题	199
第十章 铣床精度检验及万能工具铣床和龙门铣床	200
第一节 卧式和立式升降台铣床精度检验	200
第二节 X 8126型万能工具铣床	208
第三节 X 2010 A型龙门铣床	220
复习题	231
第十一章 铣床夹具	232
第一节 定位方法、定位元件和定位误差分析	232
第二节 典型夹紧方法介绍	251
第三节 典型铣夹具结构分析	269
复习题	279
第十二章 工艺规程	281
第一节 机械加工中影响加工精度和表面质量的因素	281
第二节 轴类零件加工	290
第三节 套筒类零件加工	300
第四节 箱体零件加工	310
复习题	323

第一章 铣削原理

用金属切削刀具切除工件上多余的（或预留的）金属，从而获得在形状、尺寸精度及表面质量上都合乎预定要求的加工，称为金属切削加工。切削时通过刀具切割和推挤工件，使一层金属变成切屑与工件分离的过程，称为切削过程。金属切削原理是研究以及揭示切削过程中产生的许多现象，找出规律，并用于生产实践的一门科学。

铣削加工是在铣床上利用铣刀对工件进行切削加工。铣刀是一种多刃刀具，同时参加切削的刀刃总长度较长。切削时刀具作旋转运动，可以使用较高的切削速度。铣削是金属切削加工的主要方法之一。学习铣削原理，是为了掌握铣削过程的规律，以便合理选择刀具及切削部分的几何参数，确定铣削用量，充分发挥设备的切削效能，保证加工质量，提高生产效率。

第一节 基本定义

一、铣削运动与加工表面

（一）铣削过程中必须具备的运动

铣削加工是一种常见的切削加工方法。卧式铣床上用圆柱铣刀铣削平面的情况，见图 1-1(a)。立式铣床上用端铣刀铣削平面的情况，见图 1-1(b)。

在铣削过程中，为了从工件上切去一层金属，必须具备刀具的旋转和工作台带动工件的进给两种运动组合而成的切削运动。

1. 主运动 它是切去金属切削层所必需的基本运动。在图 1-1 中，铣刀的旋转运动称为主运动。通常主运动的速度较高，消耗的功率也较大。

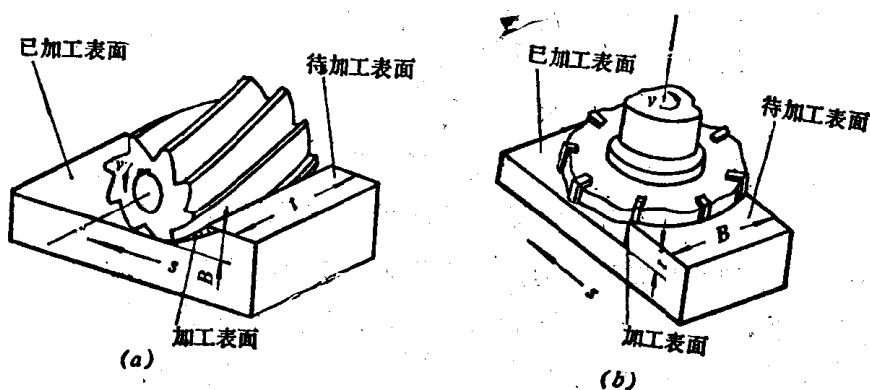


图1-1 铣削加工

(a) 卧式铣床上用圆柱铣刀铣削平面；(b) 立式铣床上用端铣刀铣平面

2. 进给运动 它是不断地把切削层投入切削的运动。在图 1-1 中，工作台带动工件的移动称为进给运动。它保证切削加工的连续进行。在铣削过程中，工作台的纵向、

横向和垂直运动都是进给运动。

(二) 铣削过程中的表面与辅助平面

1. 工件上形成的表面 由于切削运动的作用, 工件上的切削层不断地被铣刀切削并转变为切屑, 从而加工出所需要的工件新表面。在新表面形成的过程中, 工件上有三个不断变化着的表面, 见图 1-1。

- (1) 待加工表面——即将被切去金属的表面;
- (2) 加工表面——切削刃正在切削的表面;
- (3) 已加工表面——已经切去多余金属而形成的新表面。

2. 辅助平面 为了研究铣刀的几何角度, 必须把它和切削运动以及与此相联系的两个辅助平面结合起来。辅助平面有切削平面和基面。

(1) 基面——通过切削刃上选定点, 垂直于该点的切削速度方向。对旋转的铣刀来讲基面就是通过选定点, 并包含铣刀轴线的平面。

(2) 切削平面——通过切削刃上选定点与切削刃相切, 且与该点基面垂直的平面。

二、铣刀切削部分的几何角度

铣刀切削部分的几何角度一般分成圆柱铣刀和端铣刀两种基本类型来讨论。

(一) 圆柱铣刀的几何角度

螺旋齿圆柱铣刀切削部分的几何角度, 见图 1-2。

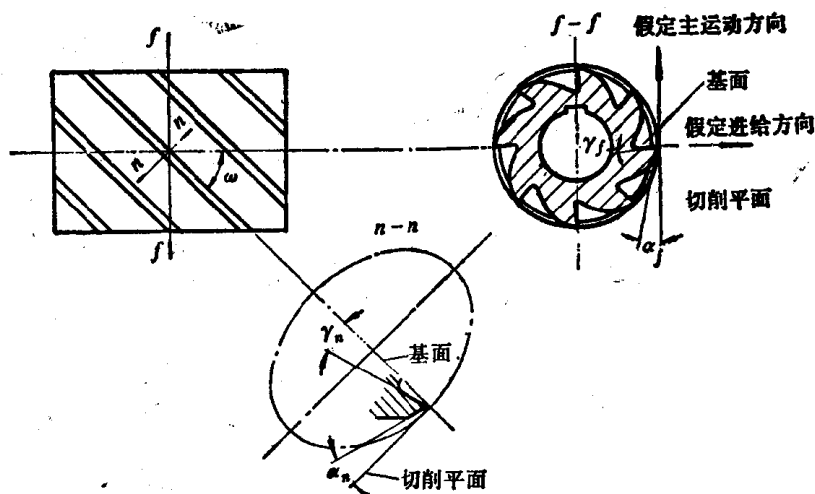


图1-2 螺旋齿圆柱铣刀的几何角度

1. 前角 对于螺旋齿圆柱铣刀, 有法截面前角和端截面前角之分。

法截面前角 γ_n , 是在垂直于主刀刃的截面内测得的前刀面与基面之间的夹角。

端截面前角 γ_f , 是在垂直于铣刀轴线的截面内测得的前刀面与基面之间的夹角。

对于螺旋齿圆柱铣刀, 规定以法截面前角 γ_n 作为前角, 它与端截面前角 γ_f 的换算关系为

$$\operatorname{tg} \gamma_n = \operatorname{tg} \gamma_f \cos \omega$$

式中 ω ——刀具螺旋角。

螺旋角

用样

2. 后角 螺旋齿圆柱铣刀的后角, 同样有法截面后角 α_n 与端截面后角 α_e 。不过, 因为刀具后面与工件的摩擦是在切削速度方向, 所以规定在端截面内测得的后刀面与切削平面之间的夹角 α_e 为标注和测量的后角, 它们之间的换算关系为

$$\operatorname{tg} \alpha_e = \operatorname{tg} \alpha_n \cos \omega$$

3. 刃倾角 主刀刃与基面之间的夹角。圆柱铣刀的螺旋角 ω 就是刃倾角 λ 。

(二) 端铣刀的几何角度

端铣刀的几何角度, 由于所选择参考系(截面)的不同, 测得的角度也不同, 但是各参考系之间有一定的换算关系。图 1-3 画出了主截面 ($o-o$)、法截面 ($n-n$)、纵截面 ($p-p$) 和横截面 ($f-f$) 等各参考系内的几何角度。

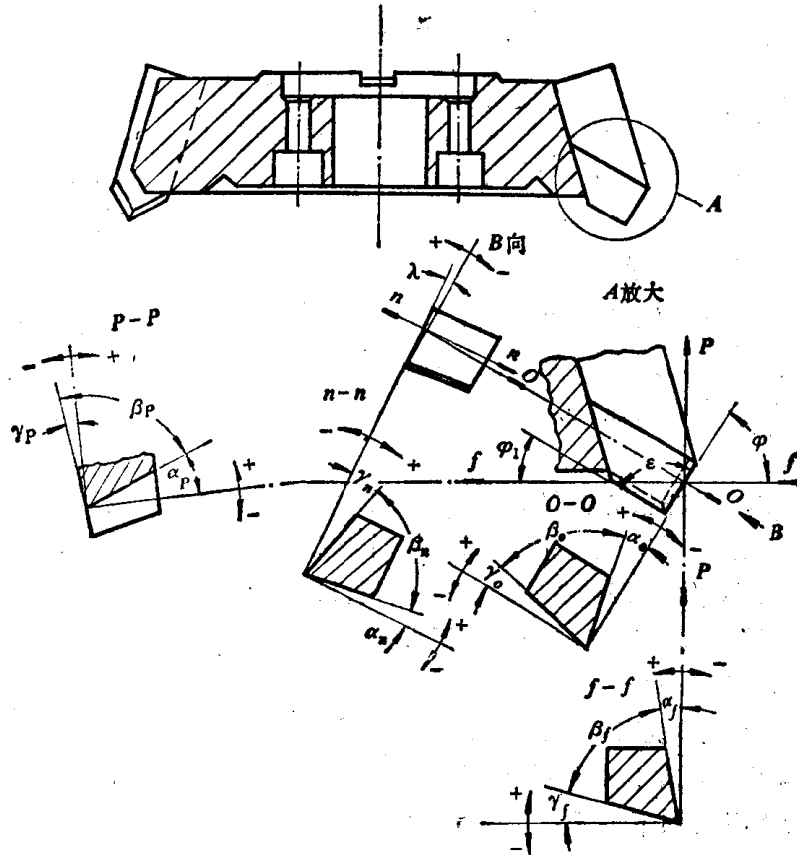


图1-3 端铣刀切削部分的几何角度

主截面是垂直于主刀刃在基面上的投影的截面。因此, 在主截面参考系内切削平面、基面、主截面三个参考平面互相垂直; 法截面是垂直于主刀刃的截面, 一般情况 (当 $\lambda \neq 0^\circ$ 时) 下, 法截面不垂直于基面; 纵截面是平行于刀轴轴线且垂直于基面的截面; 横截面是垂直于刀轴轴线和基面的截面。

1. 前角 端铣刀的前角规定为在主刀刃主截面中测得的前刀面与基面之间的夹角, 用 γ_e 表示。

由于刃倾角 λ 的存在, 所以垂直于主刀刃的法截面与主刀刃的主截面是不相同的。法截面前角 γ_n 与主截面前角 γ_e 的关系如下:

$$\operatorname{tg} \gamma_n = \frac{\operatorname{tg} \gamma_e}{\cos \lambda}$$

2. 后角 端铣刀的后角也规定为在主截面内测得的后刀面与切削平面之间的夹角, 用 α 表示。

3. 刃倾角 端铣刀的刃倾角 λ , 同样也是主刀刃与基面之间的夹角 (可以是正值, 也可以是负值)。如果刀尖首先接触工件, 则刃倾角为负; 反之, 刃倾角为正, 图1-3所示的刃倾角为正值。

4. 主偏角 即主刀刃与进给方向在基面上投影间所夹的角度, 用 φ 表示。

5. 副偏角 即副刀刃与进给方向在基面上投影间所夹的角度, 用 φ_1 表示。

三、铣削要素

(一) 铣削速度

在铣削过程中, 主运动的线速度称为铣削速度, 用 v 表示, 其计算公式如下:

$$v = \frac{\pi D n}{1000} (\text{米/分})$$

式中 D ——铣刀直径, 毫米;

n ——铣刀转速, 转/分。

对于铣刀, 在转速一定时, 由于切削刃上各点的回转半径不同, 因而切削速度也不同。在计算时, 因为从刀具方面考虑, 切削速度最大处的热量也大, 磨损快, 所以应以最大直径 (外径) 来算切削速度。

(二) 进给量

在铣削过程中, 工件相对铣刀的进给速度称为进给量。表示方式有以下三种。

1. 每分钟进给量 在一分钟内, 工件相对铣刀所移动的距离, 叫做每分钟进给量, 用 s 表示, 单位为毫米/分。每分钟进给量是调整机床进给速度的依据。

2. 每转进给量 即铣刀每转一周, 工件相对于铣刀所移动的距离, 叫做每转进给量, 用 s_n 表示, 单位为毫米/转。

3. 每齿进给量 即铣刀每转过一个刀齿, 工件相对于铣刀所移动的距离, 叫做每齿进给量, 用 s_z 表示, 单位为毫米/齿。每齿进给量是选择进给量的依据。

三种进给量之间有如下关系:

$$s_n = \frac{s}{n} = \frac{s}{zn} (\text{毫米/转})$$

式中 z ——铣刀齿数;

n ——铣刀转速, 转/分。

(三) 铣削宽度

铣削宽度 B 是指垂直于铣刀轴线方向测量的切削层尺寸^②, 见图 1-1 与图 1-4。

(四) 铣削深度

铣削深度 t 是指平行于铣刀轴线方向测量的切削层尺寸^③, 见图 1-1 与图 1-4。

① 在精加工时, 为了避免各刀刃不在同一圆周上或铣刀几何中心与旋转中心不同心等因素的影响, 就将每齿进给量当作每转进给量。

②、③ 铣削宽度和铣削深度的定义与初级本和某些铣削加工书籍有所不同, 因为铣刀在两个方向上都有切入, 如按初级本定义, 铣削宽度和铣削深度容易混淆, 以致使铣削力和功率在计算上造成误差。

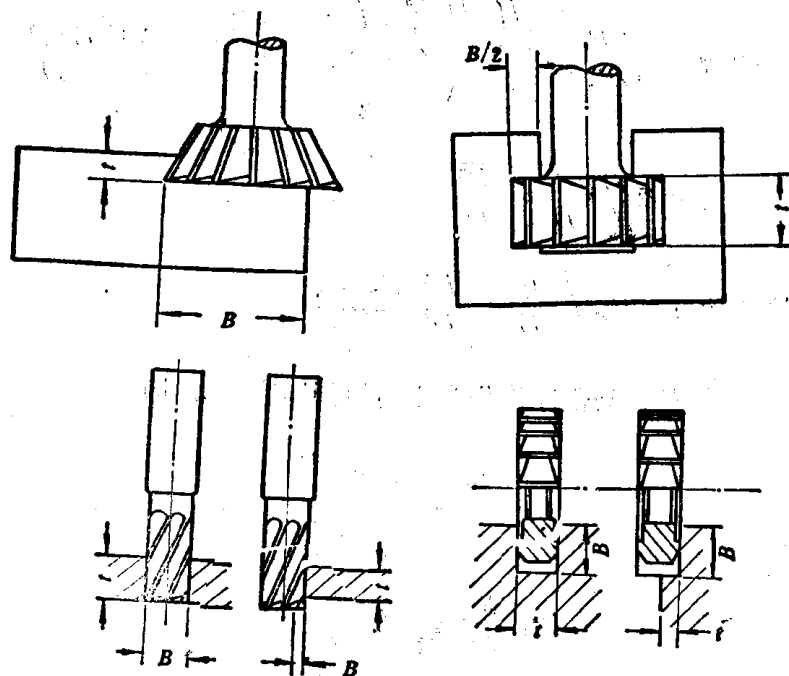


图1-4 铰削宽度和铰削深度

(五) 切削厚度

切削厚度 a 是指铣刀横截面上相邻两刀齿主刀刃运动轨迹（即切削表面）在半径方向的距离。由于铣刀是旋转刀具，其主刀刃运动轨迹是近似圆弧的曲线。所以，无论是周铣或端铣，其切削厚度 a 在圆弧上各点都是变化着的。

1. 周铣时的切削厚度 图 1-5 所示是周铣时的切削厚度。逆铣时，刀齿切入点 A 处的厚度最小（为零），而出口点 B_1 处的厚度达最大值。顺铣时，刀齿切入点 B_1 处的厚度最大，而出口点 A 的厚度最小（为零）。

ψ ——接触角。即是铣刀从切入到切出，切削接触弧的中心角。这个角度的大小由铣刀直径 D 和铣削宽度 B 来决定。

θ ——齿位角。即是铣刀刃处于接触弧中间任意位置时的中心角。

由图 1-5 可见：

$$a = s_{\text{齿}} \sin \theta \text{ (毫米)}$$

当 $\theta = 0^\circ$ 时，切削厚度最小，

$$a_{\text{最小}} = 0;$$

当 $\theta = \psi$ 时，切削厚度达最大值，

$$a_{\text{最大}} = s_{\text{齿}} \sin \psi$$

由图 1-5 中 $\triangle OB_1E$ 可知，

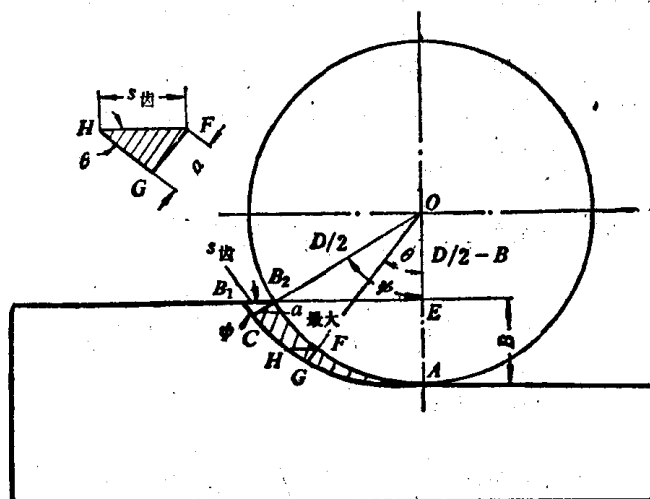


图1-5 周铣时的切削厚度

$$\sin \psi = \frac{B_2 E}{OB_2} = \frac{\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - B\right)^2}}{\frac{D}{2}} = \frac{2\sqrt{D \cdot B - B^2}}{D}$$

$$= 2\sqrt{\frac{B}{D} - \frac{B^2}{D^2}}$$

所以最大切削厚度 $a_{\max} = 2s_{\text{齿}} \sqrt{\frac{B}{D} - \frac{B^2}{D^2}}$ (毫米)

通常以 $\theta = \frac{\psi}{2}$ 处的切削厚度作为平均切削厚度 $a_{\text{平均}}$, 即

$$a_{\text{平均}} = s_{\text{齿}} \sin \frac{\psi}{2}$$

由三角关系可知:

$$\sin \frac{\psi}{2} = \sqrt{\frac{1 - \cos \psi}{2}}$$

而从图 1-5 中 $\triangle OB_2E$ 可见:

$$\cos \psi = \frac{\frac{D}{2} - B}{\frac{D}{2}} = \frac{D - 2B}{D} = 1 - 2 \frac{B}{D}$$

代入上式得

$$\sin \frac{\psi}{2} = \sqrt{\frac{1 - \left(1 - 2 \frac{B}{D}\right)}{2}} = \sqrt{\frac{B}{D}}$$

所以平均切削厚度 $a_{\text{平均}} = s_{\text{齿}} \sqrt{\frac{B}{D}}$ (毫米)

例 直齿三面刃铣刀直径 $D = 100$ 毫米, 齿数 $z = 20$, 主轴转速 $n = 95$ 转/分, 每分进给量 $s = 75$ 毫米/分, 铣削宽度 $B = 8$ 毫米, 求最大切削厚度 $a_{\max}$, 平均切削厚度 $a_{\text{平均}}$, 最小切削厚度 $a_{\min}$ 。

解 $s_{\text{齿}} = \frac{s}{nz} = \frac{75}{95 \times 20} \approx 0.04$ 毫米/齿;

$$a_{\max} = 2s_{\text{齿}} \sqrt{\frac{B}{D} - \frac{B^2}{D^2}} = 2 \times 0.04 \sqrt{\frac{8}{100} - \frac{8^2}{100^2}} \approx 0.0217 \text{ 毫米};$$

$$a_{\min} = 0;$$

$$a_{\text{平均}} = s_{\text{齿}} \sqrt{\frac{B}{D}} = 0.04 \sqrt{\frac{8}{100}} \approx 0.0113 \text{ 毫米}。$$

2. 端铣时的切削厚度 图 1-6 所示为对称端铣时的切削层。由图可见在铣刀任一经线方向的切削厚度为

$$a = B_2 F = B_1 B_2 \sin \varphi = B_2 H \cos \theta \sin \varphi = s_{\text{齿}} \cos \theta \sin \varphi$$

齿位角 θ 在 $0^\circ \sim \psi$ 之间, 当 $\theta = 0^\circ$ 时, 切削厚度最大, 即

$$a_{\text{最大}} = s_{\text{齿}} \sin \varphi \quad \text{毫米}$$

当 $\theta = \psi$ 时, 切削厚度最小, 即

$$a_{\text{最小}} = s_{\text{齿}} \cos \psi \sin \varphi \quad (\text{毫米})$$

根据图 1-6 可得:

$$\cos \psi = \frac{\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{B}{2}\right)^2}}{\frac{D}{2}} = \sqrt{1 - \frac{B^2}{D^2}}$$

代入上式后

$$a_{\text{最小}} = s_{\text{齿}} \sqrt{1 - \frac{B^2}{D^2}} \sin \varphi \quad (\text{毫米})$$

根据数学推导, 可得平均切削厚度

$$a_{\text{平均}} = \frac{s_{\text{齿}} B \sin \varphi}{D \psi} \quad (\text{毫米})$$

式中 ψ 可由 $\sin \psi = \frac{B}{D}$ 算出, 其单位为弧度。

(六) 切削宽度

切削宽度 b 是指铣刀主刀刃参加切削的长度。在铣削中, 一般有下列三种情况。

(1) 直齿圆柱铣刀或直齿三面刃铣刀的切削宽度 b 与铣削深度 t 相等, 见图 1-7。即

$$b = t$$

(2) 螺旋齿圆柱铣刀上各刀齿的切削宽度 b 是随刀齿的位置而逐渐变化, 见图 1-8。刀齿切入工件后, b 由零逐渐增大到最大值, 然后又逐渐减小到零。故总切削宽度变化平缓, 铣削过程比较平稳。

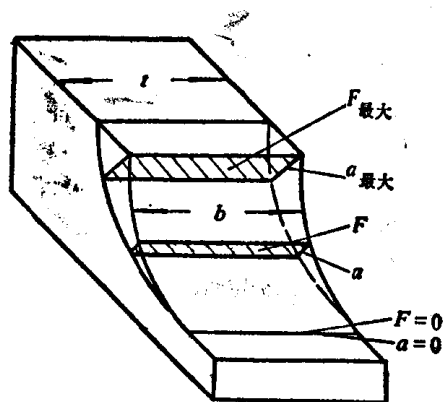


图1-7 直齿圆柱铣刀的切削宽度与切削面积

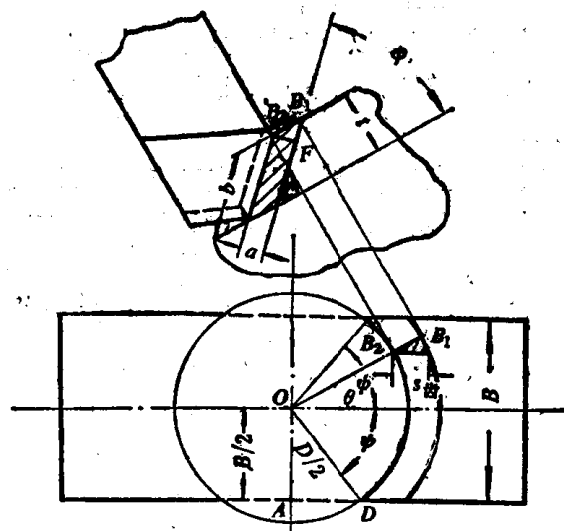


图1-6 端铣的切削层

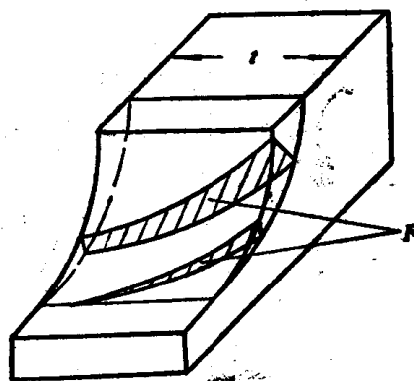


图1-8 螺旋齿圆柱铣刀的切削宽度与切削面积

(3) 端铣刀的切削宽度 o , 见图 1-6, 即

$$b = \frac{t}{\sin \varphi} \quad (\text{毫米})$$

(七) 切削面积

切削面积可以分为每齿切削面积和总切削面积。

1. 每齿切削面积 它是指在铣刀半径方向上, 切削宽度和切削厚度的乘积, 用 F 表示。

(1) 直齿圆柱铣刀和直齿三面刃铣刀铣削时, 见图 1-7。虽然切削宽度 b 不变, 并等于铣削深度 t , 但是当切削厚度 a 由零变到 $a_{\text{最大}}$, 则切削面积 F 也由零变到 $F_{\text{最大}}$ 。

$$F_{\text{最大}} = b \times a_{\text{最大}} = 2ts_{\text{齿}} \sqrt{\frac{B}{D} - \frac{B^2}{D^2}} \quad (\text{毫米}^2)$$

$$F_{\text{平均}} = b \times a_{\text{平均}} = ts_{\text{齿}} \sqrt{\frac{B}{D}} \quad (\text{毫米}^2)$$

(2) 端铣刀对称铣削时的切削面积, 见图 1-6。

$$F_{\text{最大}} = a_{\text{最大}} b = s_{\text{齿}} \sin \varphi \frac{t}{\sin \varphi} = s_{\text{齿}} t \quad (\text{毫米}^2)$$

$$F_{\text{平均}} = a_{\text{平均}} b = \frac{s_{\text{齿}} B \sin \varphi}{D \psi} \cdot \frac{t}{\sin \varphi} = \frac{s_{\text{齿}} B t}{D \psi} \quad (\text{毫米}^2)$$

(3) 螺旋齿圆柱铣刀铣削时的切削面积, 见图 1-8。显然, 这种情况下的切削宽度、切削厚度都不断地在变化着。因此, 切削面积也总是不断变化着的。

2. 总切削面积 铣刀是多刃刀具, 往往有几个刀齿同时参加切削。总切削面积就是铣刀各切削齿切削面积之和, 用 $F_{\text{总}}$ 表示。在计算总切削面积时, 可以根据刀具的齿间角和铣削时的接触角, 先算出参加切削的齿数, 然后乘以每齿平均切削面积, 就能得出总切削面积。但是, 这样计算比较繁琐, 尤其对螺旋齿圆柱铣刀铣削时, 更为困难。在实际应用中, 往往采用按下法推导出来的适用于各种铣削情况下的通用总切削面积的计算公式。其推导如下。

设每分钟铣去金属切削层的体积为 $W_{\text{分}}$ 。显然 $W_{\text{分}}$ 应等于切削层的横截面积 ($B \times t$) 乘每分进给量 (s), 即

$$W_{\text{分}} = Bts \quad (\text{毫米}^3/\text{分})$$

而切屑沿前刀面流出的速度应等于铣削速度 v 。总切削面积 $F_{\text{总}}$ 乘以每分钟流出的切屑长度, 亦应等于每分钟切去的金属切削层体积, 即

$$W_{\text{分}} = F_{\text{总}} v 1000 \quad (\text{毫米}^3/\text{分})$$

所以

$$F_{\text{总}} v 1000 = Bts$$

$$F_{\text{总}} = \frac{Bts}{v 1000}$$

将 $v = \frac{\pi D n}{1000}$, $s = s_{\text{齿}} z n$

代入上式得

$$F_{\text{总}} = \frac{Bts_{\text{齿}}zn}{\pi D n} = \frac{Bts_{\text{齿}}z}{\pi D} \quad (\text{毫米}^2)$$

上式可适用于周铣 (直齿或螺旋齿圆柱铣刀) 或端铣。并且, 它与每齿平均切削面积乘参加切削的齿数所得的结果是完全相同的。

第二节 金属切削过程

一、切屑形成过程

(一) 切削过程的本质

1. 刀具对被切金属的切割和推挤作用 在切削过程中, 随着工件与刀具的相互逼近, 刀刃与被切金属接触处的局部应力逐渐增大达到破裂, 使被切金属层沿刀刃接触处分离。在此同时, 前刀面则撑挤被分离的金属层, 使距接触处一定深度范围内也产生应力。如果给以足够的动力使相对运动连续进行, 被切金属将沿刀刃运动方向分离而形成已加工表面; 同时前刀面的撑挤使被切削层产生弹性变形、塑性变形最后形成切屑沿前刀面流出。由此可见, 在金属切削过程中, 刀具对被切金属的作用包括刀刃的作用和前刀面的作用。我们把刀刃造成被切金属内局部应力很大, 并因而使被切金属沿刀刃分离的作用称为刀刃的切割作用。而前刀面对切削层金属的撑挤, 使被切削层金属产生弹性变形、塑性变形而形成切屑流出的作用称为前刀面的推挤作用。

刀刃的切割和前刀面的推挤是刀具对被切金属的基本作用。通常说刀具锐利, 是说刃口圆弧半径很小, 前角较大。刃口圆弧半径小, 使刃口与工件接触处的局部应力增大, 加强切割作用。前角大不但使切屑变形减小, 推挤作用减轻, 同时容易获得较小的刃口圆弧半径加强切割作用, 因而减小了刀具受到的阻力, 使切削过程比较轻快。

2. 被切削金属在刀具作用下的变形 被切削金属在刀具作用下, 考虑到刀刃、前刀面和后刀面的作用特点, 可分为四个区域来讨论, 见图 1-9。

(1) 基本变形区就是图 1-9 中 OA 和 OE 两条线所围的区域 1。 OA 线上的切应力数值刚好达到被切削金属的屈服强度, 塑性变形开始, 故称 OA 线为始滑移线。位于该线左侧的金属处于弹性变形状态。随着刀具相对工件的连续运动, 弹性变形区的金属达到 OA 线而开始塑性变形, 原来处于始滑移线上的金属不断向刀具逼近, 应力和应变逐渐增大, 当到达 OE 线时, 应力和变形达到最大值, 基本变形到此结束。越过 OE 线后切削层金属就变成切屑流走。 OE 线称为终滑移线。

基本变形区主要是由前刀面的推挤作用造成的。它是四个变形区中变形量最大的一个, 所以常用基本变形区的变形量大小来近似地表示切削过程的变形量。

(2) 前刀面摩擦变形区就是图 1-9 中区域 2 所示的范围。在切削层金属变成切屑而沿前刀面流出时, 由于前刀面和切屑间存在着很大的压力, 相互发生很大的摩擦, 切屑中产生平行于前刀面的切应力, 使切屑底层的流动速度较切屑其它部分缓慢得多, 这种现象称为滞流现象。产生滞流现象的切屑底层叫滞流层。在切应力的作用下, 切屑底层在刀具前刀面方向上又一次产生塑性变形, 使切屑层底层金属沿前刀面方向伸长, 这种变形称为前刀面摩擦变形。显然, 切屑底层金属的变形最大, 使切屑向上卷曲离开前

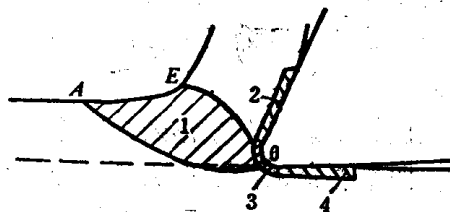


图1-9 四个变形区

1—基本变形区; 2—前刀面摩擦变形区; 3—刃前变形区; 4—后刀面摩擦变形区

刀面成为切屑。

(3) 刃前变形区就是图 1-9 中区域 3 所示的范围。所谓刃口就是前刀面和后刀面的交线。但是无论刃磨质量多么好, 严格说来刃口总是呈圆弧状, 见图 1-10。在切削过程中, 由于刃口是圆弧, 所以各点处作用力的方向是变化的。当刃口圆弧上某点 F 处的正压力 P_F 与切削速度方向成 45° 时, 则 F 点就是刃前金属的分离点。如果从该点前被切金属内取单元体, 见图 1-10, 则在力 P_F 作用下单元体受压缩, 单元体内的最大切应力方向与切削速度方向一致, 因而金属层就沿着切削速度方向滑移分离, 一部分金属留在已加工表面上, 另一部分成为切屑流走。刃前金属滑移分离的过程, 就是刀刃的切割作用。

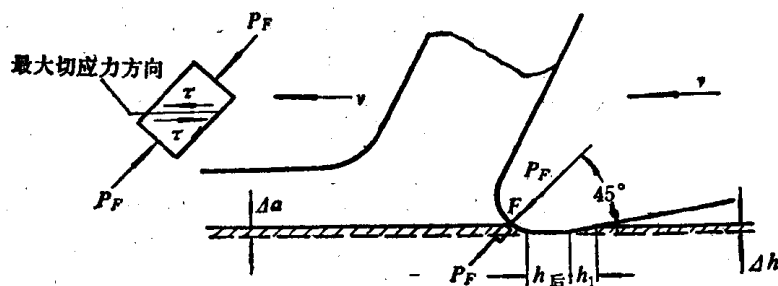


图1-10 刃前金属的分离点及后刀面的接触情况

(4) 后刀面摩擦变形区就是图 1-9 中区域 4 所示的范围。从图 1-10 中可见, 被切金属的分离点 F 不在刃口圆弧的最低点, 所以会有厚度为 Δa 的一薄层金属留下来并受到刃口圆弧下部的挤压。此外, 由于后刀面有磨损棱面 h_h 和加工表面的弹性恢复量 Δh , 使已加工表面与后刀面有着长度为 $h_h + h_l$ 的一段接触面, 进而增加了已加工表面所受到的挤压与摩擦。这些原因都将使已加工表面金属层在一定范围内产生塑性变形。后刀面摩擦变形是造成已加工表面冷硬现象和产生残余应力的主要原因, 因而直接影响着已加工表面的质量。

金属在上述四个变形区内变形的总和, 就是被切金属在刀具作用下塑性变形的全部内容。四个变形区内的应力状态和变形情况互相联系, 互相影响, 又互有区别。刃前变形区位于其它三个变形区的汇交处, 其应力状态复杂, 应力区很小, 应力数值很大, 并一定要滑移分离, 达到破坏的程度, 这是刃前变形区的一个重要特征。

(二) 切屑种类及形成条件

在切屑形成过程中, 由于塑性变形(滑移)程度的不同或工件材料的塑性不同而产生不同的切屑。以切屑的不同形态可分为带状切屑、节状切屑、粒状切屑及崩碎切屑四种, 见图 1-11。

1. 带状切屑 在切削过程中, 若终滑移面上的滑移尚未到达破裂的程度时, 则形成的切屑将连绵不断, 外表面呈毛茸状而内表面光滑, 这种切屑称为带状切屑, 见图 1-11(a)。带状切屑是最常见的一种切屑, 一般加工塑性金属材料, 切削速度较高, 切削厚度较小, 刀具前角较大往往得到这类切屑。形成带状切屑的切削过程比较平稳, 切削力波动较小, 已加工表面光洁度较高。

2. 节状切屑 若终滑移面上的滑移较充分, 而达到破裂的程度, 使切屑发生不贯穿的裂纹, 外表面呈锯齿形, 内表面光滑, 这种切屑称为节状切屑, 见图 1-11(b)。这

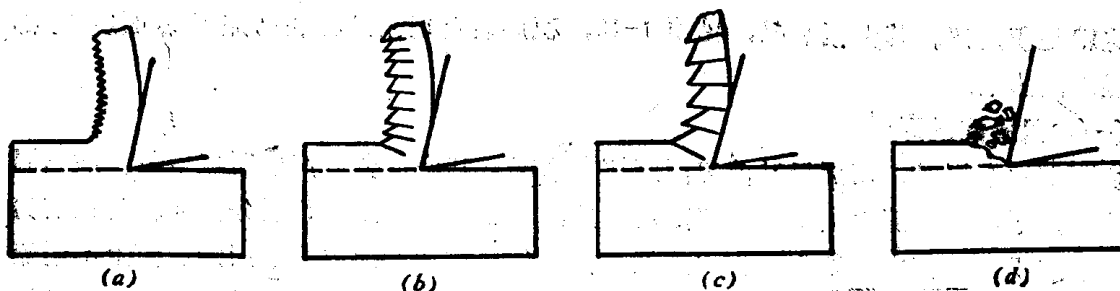


图1-11 切屑的种类

(a) 带状切屑; (b) 节状切屑; (c) 粒状切屑; (d) 崩碎切屑

种切屑大都在切削速度较低, 切削厚度较大, 刀具前角较小的情况下产生。

3. 粒状切屑 如果切削速度更低、切削厚度更大、刀具前角更小时, 裂纹将贯穿整个切屑层, 使切屑成为梯形的单元体分离, 称为粒状切屑, 见图 1-11(c)。

4. 崩碎切屑 切削脆性金属 (如灰铸铁、青铜等) 时, 由于材料的塑性很小, 切削层内靠近刀刃和前刀面的局部金属发生弹性变形以后, 未见明显的塑性变形即突然崩裂, 形成不规则的碎块, 称为崩碎切屑, 见图 1-11(d)。工件材料越是硬脆、刀具前角越小、切削厚度越大时, 越容易产生这类切屑。这种切屑同刀具前刀面的接触长度较短, 切削力集中在刀刃附近, 容易造成崩刃, 所以无论从切削力或加工质量的观点都应设法避免产生崩碎切屑。

根据上面分析可知, 切屑的形态是随切削条件而转化的: 如加大前角, 提高切削速度, 减小切削厚度即可向带状切屑转化; 反之减小前角, 降低切削速度, 加大切削厚度, 则向粒状切屑转化。在加工过程中, 可以根据具体的条件和要求来控制切屑的形态。

(三) 变形系数

被切金属经过塑性变形后, 形成的切屑, 其厚度比切削层厚度大; 长度比切削层长度短, 见图 1-12。

切屑厚度 $a_{\text{屑}}$ 与切削层厚度 a 之比称为厚度变形系数; 而切削层长度 L 与切屑长度 $L_{\text{屑}}$ 之比称为长度变形系数。由于工件上切削层的宽度与切屑宽度差异极小, 切屑体积等于切削层体积, 因此, 厚度变形系数等于长度变形系数, 并统称为变形系数, 用 K 表示。

$$K = \frac{a_{\text{屑}}}{a} = \frac{L}{L_{\text{屑}}}$$

变形系数 K 是大于 1 的数, K 越大表示切削过程中变形越大, 因此可以用来近似地衡量和表示切削过程中金属的变形程度。

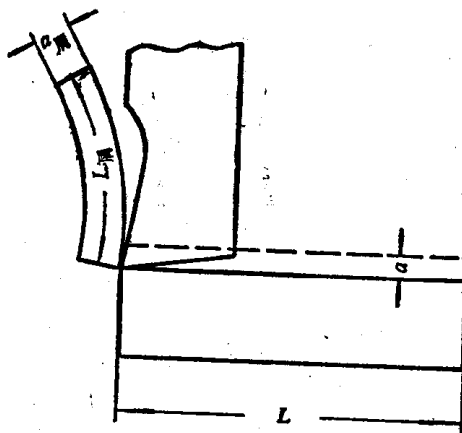


图1-12 切削层金属变为切屑时长度与厚度的变化情况

二、积屑瘤

在切削塑性金属过程中, 有时会发现靠近刀刃的前刀面上牢固地粘附着一小块金

屑，这就是积屑瘤。其大概情况，见图 1-13。积屑瘤对切削过程和已加工表面质量都有着显著的影响。

(一) 积屑瘤的形成

切削塑性金属时，切屑经过前刀面摩擦变形区，其底层金属产生滞流现象。在高温高压的作用下，当摩擦力大于某一极限值以后，滞流层的金属与切屑分离而粘着在前刀面上，形成积屑瘤。由于切削过程的连续进行，切屑在初始形成的积屑瘤表面上不断流过，而层积在它上面。这样不断层积，积屑瘤就不断增高。当积屑瘤长到一定高度时，由于积屑瘤改变了前刀面的实际形状，使切屑与前刀面的接触条件和受力情况发生变化，积屑瘤不再增长，便形成了一个完整的积屑瘤。但当积屑瘤与切屑之间摩擦力大于其附着力时，这个积屑瘤就会被切屑带走。

(二) 积屑瘤对切削过程的影响

积屑瘤在形成过程中，金属剧烈变形，引起强化，它的硬度很高（约为原工件硬度的 1.5~2.5 倍），故积屑瘤可以代替刀刃进行切削。有积屑瘤时，切屑沿其表面流出，增大了实际前角，见图 1-13，使切屑变形和切削力减小。此外，还可以减少刀具与切屑、已加工表面之间的直接接触，起到保护刀刃的作用，所以，粗加工时产生积屑瘤有一定的好处。但由于积屑瘤相当于一个圆钝的刃口，会使刀具切削作用下降，已加工表面的金属变形增大。同时由于积屑瘤伸出刀刃，以及积屑瘤的长大和脱落，会影响加工尺寸和表面光洁度。因而在精加工时，应尽量避免产生积屑瘤。

(三) 影响积屑瘤的主要因素

1. 工件材料 当工件材料的硬度低、塑性大时，在切削过程中金属变形大，切屑与前刀面间的摩擦系数和接触长度都较大，故容易产生积屑瘤。当切削硬脆材料时，则积屑瘤产生的可能性较小。

2. 切削速度 切削速度对积屑瘤的影响，见图 1-14。在中等速度时积屑瘤最大，这是因为在中速（ $v = 20$ 米/分）时切削温度约为 300°C 左右，这时的摩擦系数最大。切削速度提高或降低时，切削温度也随着升高或降低，使摩擦系数降低，从而使积屑瘤减小。

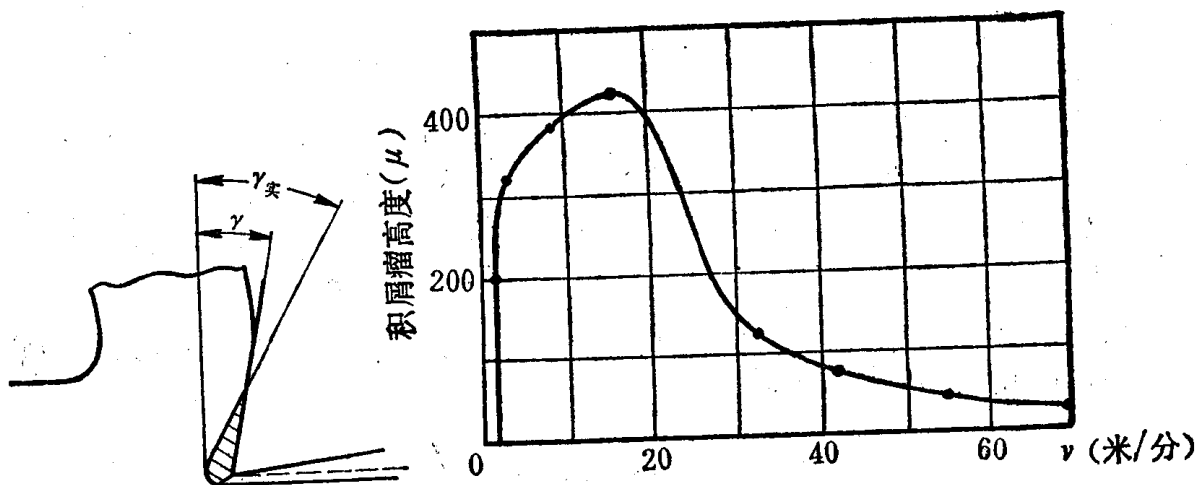


图1-13 积屑瘤

图1-14 切削速度对积屑瘤高度的影响

3. 刀具前角 前角增大可以减小切屑的变形和切屑与前刀面的摩擦，从而使积屑

瘤减小。

此外，减小切削厚度，提高前刀面光洁度及合理使用冷却润滑液都可减少积屑瘤。

三、已加工表面的冷硬现象

金属经过冷加工之后，强度、硬度提高，而塑性下降，这种现象称为冷作硬化，简称冷硬现象。这一现象是由金属材料在加工过程中的塑性变形所造成，变形越大，冷硬现象越严重。

在金属切削过程中，被切金属在刀具的作用下产生很大的塑性变形，因而冷硬现象也严重存在着。这种冷硬现象通常是指已加工表面而言的。在切削过程中，基本变形区往往深入到已加工表面以下，刃前变形区包括已加工表面以下的一定深度；已加工表面最后形成之前，由于刀刃圆弧的挤压和后刀面的摩擦，将再一次产生塑性变形，因而在已加工表面以下的一定深度范围内也会出现冷硬现象。

切削加工所造成的已加工表面硬化层，尤其是受拉应力造成的硬化层，常常伴随着表面裂纹，使表面光洁度和疲劳强度下降，并且使下道工序的刀具易被磨损。因此，应设法减轻这种现象。

综合本节所述可知，塑性变形是切削过程中一个重要的现象。随着塑性变形而发生切屑的卷曲、收缩、切屑成为各种不同的形态、产生积屑瘤和已加工表面的硬化等现象。而且当塑性变形越严重时，切屑的收缩及卷曲越厉害，切屑也易为节状或粒状，积屑瘤也越大，已加工表面硬化也越严重。因此，可以改变塑性变形的程度来改变其它现象，使切削过程得以改善。

第三节 铣削力和铣削功率

在铣削过程中，铣刀和工件间相互作用着力，并消耗功率。消耗的机械能又转化为热能。铣削力直接影响着切削热的产生，并进一步影响着刀具磨损、耐用度和已加工表面的质量。在生产中，铣削力又是计算机床功率和确定夹紧力的必要依据。因此，研究铣削力的变化规律将有助于分析铣削过程，并对生产实际具有重要的指导意义。

一、铣削力的来源和铣削力的分解

(一) 铣削力的来源

在铣刀的作用下，切削层金属、切屑和工件表面层金属都要产生弹性变形和塑性变形，因此就有变形抗力作用在铣刀上；又因切屑沿前刀面流出和后刀面与工件表面之间的相对运动，故有摩擦力作用在铣刀的前、后刀面上。这些力的合力就是作用在铣刀上的铣削抗力 P' ，见图 1-15(a)。一般铣削抗力是一个空间力，由铣床动力来克服。根据牛顿第三定律可知：在工件上也必定作用着一个等值反向的铣削力 P ，见图 1-15(a)。铣削力 P 的作用使金属成为切屑被切除。

显然，铣削力的来源有两方面：一是工件切削层金属、切屑和工件表面层金属的弹