

# 切削原理与控制

## 第四章 切削力

---

王大中

上海工程技术大学

## 第一节 切削力的来源、切削合力及其分解、切削功率

切削过程中，切削层金属之所以会产生变形，主要在于刀具给予力的作用，这个作用在工件或刀具上的力就叫**切削力**。

### 一、切削力的来源

- (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) 克服切屑对刀具前刀面、工件过渡表面和已加工表面对刀具后刀面的摩擦力。它们分别用 $F_f$ 和 $F_{f\alpha}$ 表示。

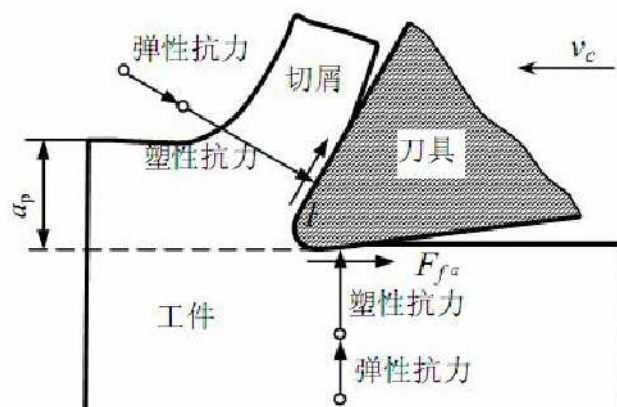
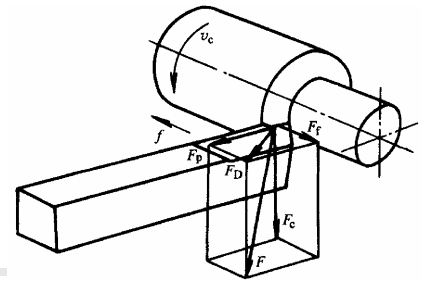


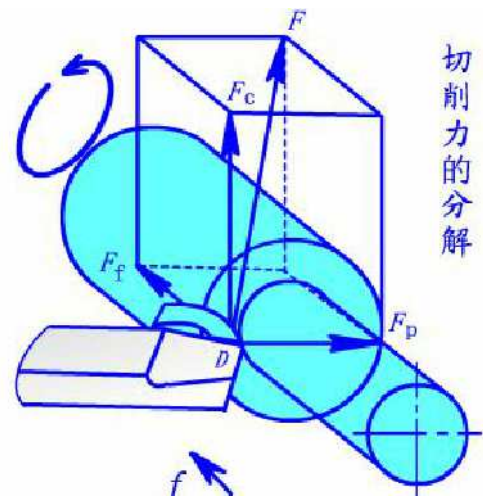
图 切削力的来源

## 二 切削力合力及其分解



变形力和摩擦力形成了作用在刀具上的合力 $F_N$ 。为了便于测量、计算和反映实际作用的需要，常将合力 $F$ 分解为互相垂直的 $F_z$ 、 $F_x$ 和 $F_y$ 三个分力，如图所示。

- **切削力 $F_z$ （主切削力、切向力 $F_c$ ）：**  
在主运动方向上的分力，它切于加工表面，并与基面垂直。 $F_c$ 用于计算刀具强度，设计机床零件，确定机床功率等。
- **进给力 $F_x$ （进给抗力、轴向力 $F_f$ ）：**  
在进给运动方向上的分力，它处于基面内与进给方向相反。 $F_f$ 用于设计机床进给机构和确定进给功率等。
- **背向力 $F_y$ （切深抗力、径向力 $F_p$ ）：**  
在垂直于工作平面上分力，它处于基面内并垂直于进给方向。 $F_p$ 用来计算工艺系统刚度等。它也是使工件在切削过程中产生振动的力。



## 二 切削力合力及其分解

各力之间的关系:

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

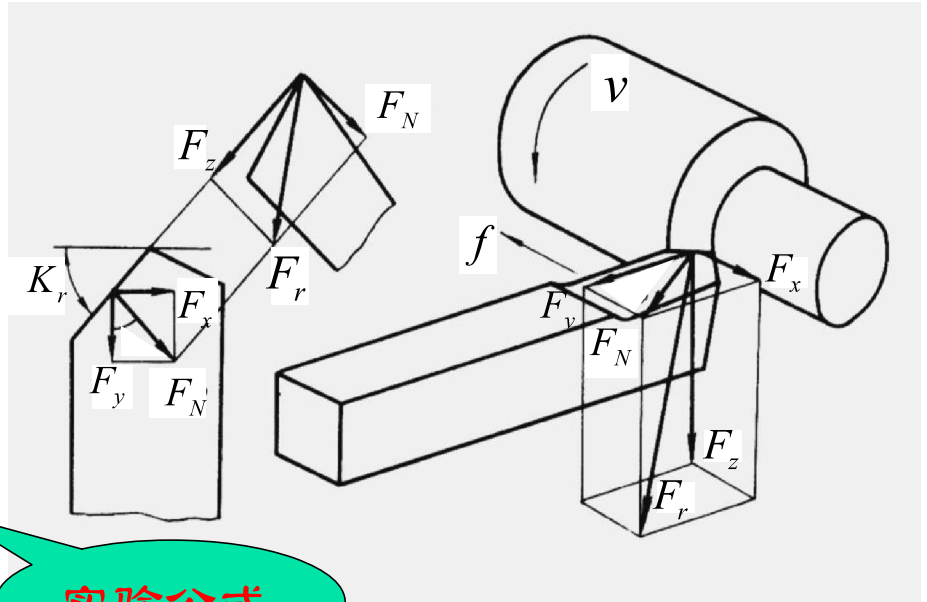
$$F_x = F_N \sin \kappa_r$$

$$F_y = F_N \cos \kappa_r$$

$$F_y = (0.4 \sim 0.5)F_z$$

$$F_x = (0.3 \sim 0.4)F_z$$

$$F_r = (1.12 \sim 1.18)F_z$$



实验公式

$$K_r = 45^\circ, \lambda_s = 0, \gamma_o \approx 15^\circ$$

### 三 切削功率

教学要求：掌握根据已知条件计算切削功率，确定机床电动机功率的方法

单位时间内消耗在切削过程中的功称为切削功率  $P_m$ 。

切削功率为切削力  $F_z$  和进给力  $F_x$  所耗功率之和，由于径向力  $F_y$  方向上没有发生位移，因此径向力不消耗功。于是有

$$P_m = \left( F_z v + \frac{F_x n_w f}{1000} \right) \times 10^{-3} kW$$

若忽略  $\frac{F_x n_w f}{1000} \times 10^{-3}$

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

式中  $F_z$  —— 切削力 (N)  
 $F_x$  —— 进给力 (N)  
 $n_w$  —— 工件转速 (r/s)  
 $f$  —— 进给量 (mm/r)

根据上式求出切削功率，可按下式计算机床电动机功率  $P_E$ ：

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

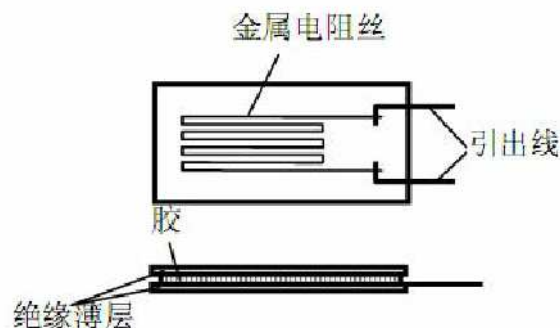
$\eta_m = 0.75 \sim 0.85$ ，新机床用大值，旧机床用小值。

切削力的大小



经验公式  
理论公式  
仪器测量

## 第二节 切削力的测量



电阻应变片图

### 1. 间接测量法

在没有专用测力仪器的情况下，可以使用功率表测出机床电动机在切削过程中所消耗的功率  $P_m$ ，然后按第一节的公式 (4-3) 计算出  $P_E$ 。这种方法只能粗略的估算出切削力的大小。

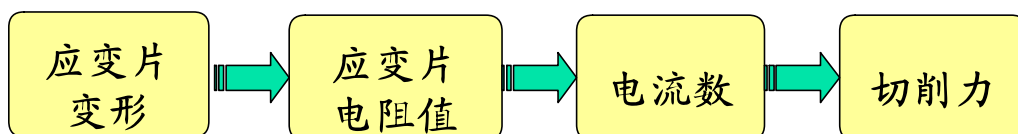
### 2. 直接测量法

测力仪是测量切削力的主要仪器，按其工作原理可分为机械式、液压式和电测式。电测式又可分为电阻应变式、电磁式、电感式、电容式以及压电式。目前常用的是电阻式测力仪和压电式测力仪。

#### 1) 电阻应变式测力仪

这种测力仪常用的电阻元件是电阻应变片。

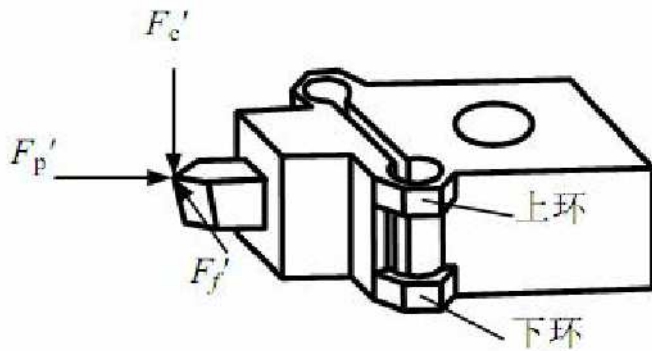
电阻应变式测力仪  
压电式测力仪



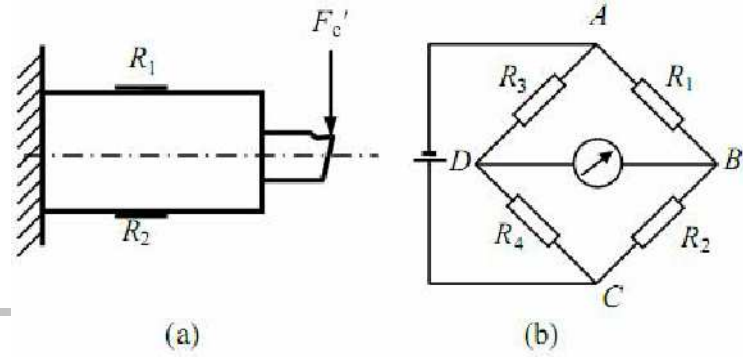
## 第二节 切削力的测量

### 2) 压电式测力仪

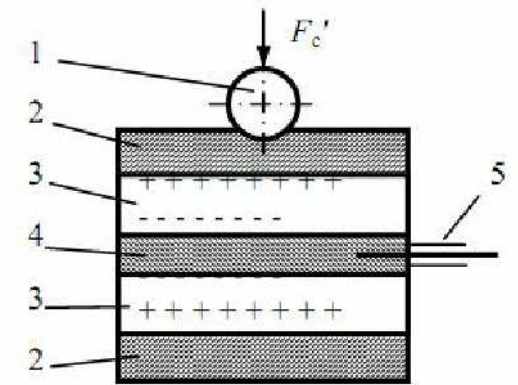
当受力时其表面产生电荷，电荷的多少仅与所施加的外力的大小成正比。用电荷放大器将电荷转换成相应的电压参数就可以测出力的大小



八角环型电阻式三向车削测力仪图



弹性元件上的电阻应变片组成电桥



单一压电传感器原理图

1—小球；2—金属片；3—压电晶体；  
4—电极；5—绝缘导线

### 第三节 切削力的经验公式

#### 指数形式公式 单位切削力计算公式

#### 一 指数形式公式

目前生产实际中采用的计算公式都是通过大量的试验经数据处理后而得到的经验公式。如指数形式公式：

$$F_z = C_{Fz} a_p^{x_{Fz}} f^{y_{Fz}} v^{n_{Fz}} K_{Fz};$$

$$F_y = C_{Fy} a_p^{x_{Fy}} f^{y_{Fy}} v^{n_{Fy}} K_{Fy};$$

$$F_x = C_{Fx} a_p^{x_{Fx}} f^{y_{Fx}} v^{n_{Fx}} K_{Fx}.$$

式中  $C_{Fz}$  ,  $C_{Fy}$  ,  $C_{Fx}$  —— 与工件、刀具材料有关系数;  
 $x_{Fz}$  ,  $x_{Fy}$  ,  $x_{Fx}$  —— 切削深度  $a_p$  对切削力影响指数;  
 $y_{Fz}$  ,  $y_{Fy}$  ,  $y_{Fx}$  —— 进给量  $f$  对切削力影响指数;  
 $K_{Fz}$  ,  $K_{Fy}$  ,  $K_{Fx}$  —— 考虑切削速度、刀具几何参数、  
刀具磨损等因素影响的修正系数。



## 第三节 切削力的经验公式 单位切削力计算

### 二 单位切削力计算

单位切削力是指单位面积上的切削力，用 $p$ 表示。如果单位切削力是已知的，则可以利用下式计算出切削力 $F_z$ 。

$$p = \frac{F_z}{A_c} = \frac{F_z}{a_p f} = \frac{F_z}{a_c a_w} \text{ N/mm}^2$$

式中  $A_c$  —— 切削面积；  
 $a_p$  —— 背吃刀量；  
 $f$  —— 进给量；  
 $a_c$ 、 $a_w$  —— 切削厚度、切削宽度。

## 第三节 切削力的经验公式 单位切削功率

### 三 单位切削功率

每切除单位体积的金属材料所消耗的功率称为单位切削功率，用 $p_s$ 表示。

$$p_s = \frac{P_m}{Z_w} \text{ kW} / (\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$$

式中  $Z_w$  —— 单位时间内的金属切除量

$P_m$  —— 切削功率

$$\begin{cases} Z_w \approx 1000va_p f (\text{mm}^3 / \text{s}) \\ P_m = F_z v \times 10^{-3} = pa_p f v \times 10^3 (\text{kW}) \end{cases}$$

$$\Rightarrow P_s = \frac{pa_p f v \times 10^3}{1000va_p f} = p \times 10^{-6}$$

## 第四节 影响切削力的因素 工件材料

### (1) 工件材料

- 工件材料的强度、硬度越高，剪切屈服强度  $\tau_s$  越高，切削时产生的切削力越大。
- 工件的化学成分会影响材料的物理力学性能，从而影响切削力的大小。
- 工件材料的塑性、冲击韧度越高，切削变形越大，切屑与刀具间摩擦增加，则切削力越大。
- 加工脆性材料时，因塑性变形小，切屑与刀具间摩擦小，切削力较小。

例如：加工60钢的切削力 $F_c$ 比45钢增大4%，加工35钢的切削力 $F_c$ 比45钢减小13%。

## 第四节 影响切削力的因素 切削用量

### (2) 切削用量

#### 一 背吃刀量和进给量对切削力的影响

- 切削用量对切削力的影响较大，背吃刀量和进给量增加时，使切削面积 $A_D$ 成正比增加，变形抗力和摩擦力加大，因而切削力随之增大，当背吃刀量增大一倍时，切削力近似成正比增加；

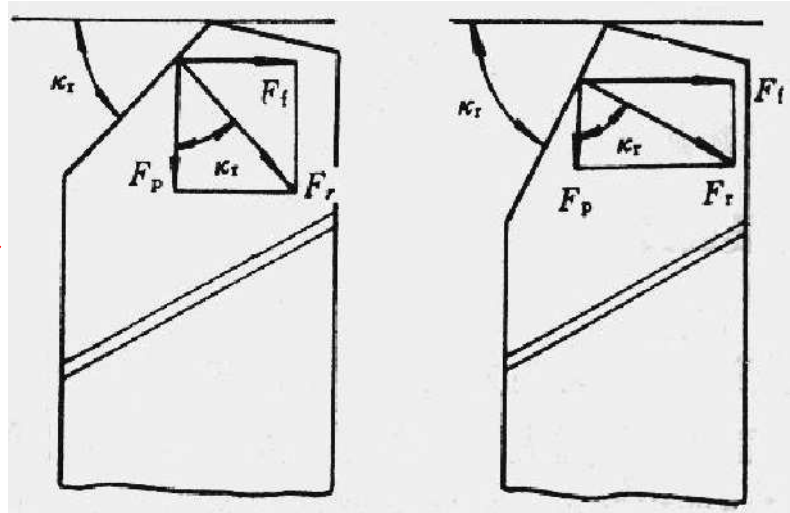
#### 二 切削速度对切削力的影响

切削塑性材料时，切削速度对切削力的影响分为有积屑瘤阶段和无积屑瘤阶段两种情况：

- 在低速范围内，随着切削速度的增加，积屑瘤逐渐长大，刀具实际前角增大，使切削力逐渐减小。
- 在中速范围内，积屑瘤逐渐减小并消失，使切削力逐渐增至最大。
- 在高速阶段，由于切削温度升高，摩擦力逐渐减小，使切削力得到稳定的降低。

### (3) 刀具几何参数

- 前角  $\gamma$ 。增大，切削变形减小，故切削力减小。
- 主偏角  $K_r$  对切削力  $F_z$  的影响较小，而对进给力  $F_x$  和背向力  $F_y$  影响较大，由右图可知当主偏角增大时， $F_x$  增大， $F_y$  减小。
- 刃倾角  $\lambda_s$  在很大范围 ( $-40^\circ \sim +40^\circ$ ) 内变化时，对  $F_z$  没有什么影响，但  $\lambda_s$  增大时， $F_x$  增大， $F_y$  减小。



主偏角对  $F_x$  和  $F_y$  的影响

### (4) 其它因素

- 刀具材料与工件材料之间的摩擦系数  $\mu$  会直接影响到切削力的大小。一般按立方碳化硼刀具、陶瓷刀具、涂层刀具、硬质合金刀具、高速钢刀具的顺序，切削力依次增大。
- 切削液有润滑作用，使切削力降低。切削液的润滑作用愈好，切削力的降低愈显著。在较低的切削速度下，切削液的润滑作用更为突出。
- 刀具的前后刀面刃磨质量越好，摩擦系数越小，切削力越小。



## 小结

---