

船机制造工艺学

Shipping machinery manufacture process

教师：王静思

大连海事大学轮机工程学院

Lecturer: Jingsi Wang

Marine engineering college of DMU

第一章 机械加工精度和表面质量

Chapter 1 Basic Terms of Machining Accuracy and Surface Quality

内容回顾：

内容提要：

第一节 加工精度的基本概念

第二节 影响加工精度的因素及其分析

第三节 机械加工的精度分析

第四节 机械加工表面质量的基本概念

第五节 影响表面质量的因素及其分析

第六节 机械加工振动及抑制振动的途径

第一节 加工精度的基本概念

Part 1 The concept of machining accuracy

一、什么是加工精度和加工误差？

What are the concepts of machining accuracy and machining error

加工精度：零件加工后实际的几何参数（尺寸、形状、位置）与理论几何参数符合的程度。

Machining accuracy: is the accordance degree between the actual and theoretical geographic parameters (dimension, form and position) of the product.

加工误差：零件加工后实际的几何参数（尺寸、形状、位置）与理论几何参数的偏离程度。

Machining error: is the disagreement degree between the actual and theoretical geographic parameters (dimension, shape and position) of the product.

加工精度的高低是通过加工误差的大小来衡量的。

Machining accuracy is represented by the value of machining error.

加工误差的类型：

- (1) 系统性误差：常值系统性误差、变值系统性误差。
- (2) 随机误差。

加工误差类型

(1) 系统性误差：

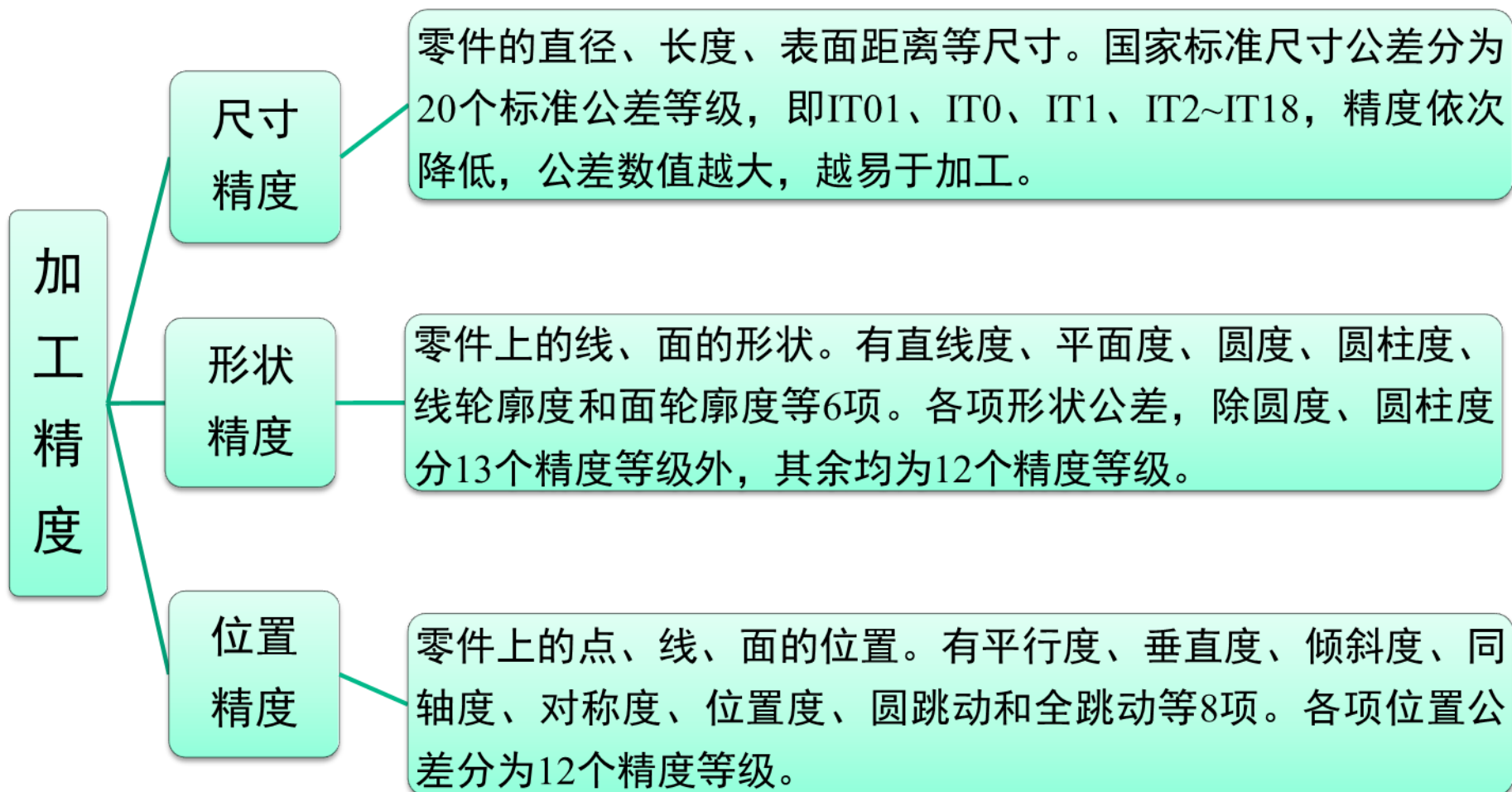
常值系统性误差 顺次加工一批工件后，其大小和方向保持不变的误差，称为常值系统误差。例如加工原理误差和机床、夹具、刀具的制造误差等，都是常值系统误差。此外，机床、夹具和量具的磨损速度较慢，在一定时间内也可看作是常值系统误差。

变值系统性误差 顺次加工一批工件中，其大小和方向按一定的规律变化的误差，称为变值系统误差。例如机床、夹具和刀具等在热平衡前的热变形误差和刀具的磨损等，都是变值系统误差。

(2) 随机误差

顺次加工一批工件，出现大小和方向不同且无规律变化的加工误差，称为随机性误差。例如毛坯误差(余量大小不一、硬度不均匀等)的复映、定位误差(基准面精度不一、间隙影响)、夹紧误差(夹紧力大小不一)、多次调整的误差、残余应力引起的变形误差等，都是随机性误差。随机性误差从表面看来似乎没有什么规律，但是应用数理统计的方法可以找出一批工件加工误差的总体规律，然后在工艺上采取措施来加以控制。

加工精度内容

















加工精度内容

不同加工方法对应的公差范围

加工方法	公差等级 (IT)	加工方法	公差等级 (IT)
研磨	1~5	粉末冶金烧结	7~10
珩	4~7	车	7~11
金刚石车、镗	5~7	镗	7~11
圆磨、平磨	5~8	铣	8~11
拉削	5~8	刨、插	10~11
粉末冶金成型	6~8	钻孔	10~13
铰孔	6~10	冲压	10~14
滚压、挤压	6~10	压铸	11~14

加工精度内容

形状精度

公差	项目	符号	公差	项目	符号
形状	直线度		位置	定向	平行度 
	平面度				垂直度 
	圆度				倾斜度 
	圆柱度			定位	同轴（同心）度 
形状或位置	线轮廓度				对称度 
	面轮廓度				位置度 
				跳动	圆跳动 
					全跳动 

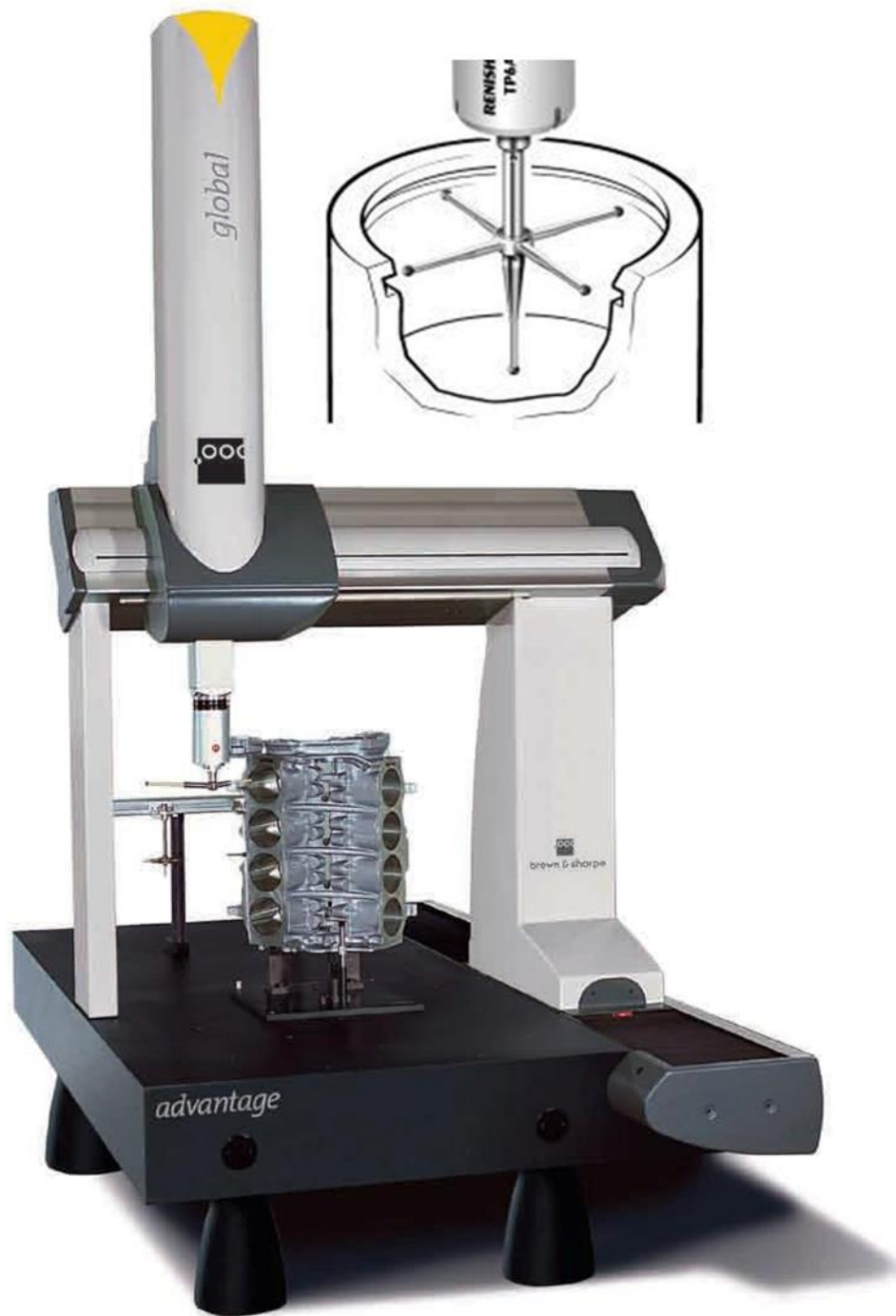
位置精度

尺寸精度、形状精度和相互位置精度，三者之间是既有区别又有联系。当尺寸精度要求高时，相应的位置、形状精度也要求高。

加工精度检测



三坐标测量仪



三坐标测量仪

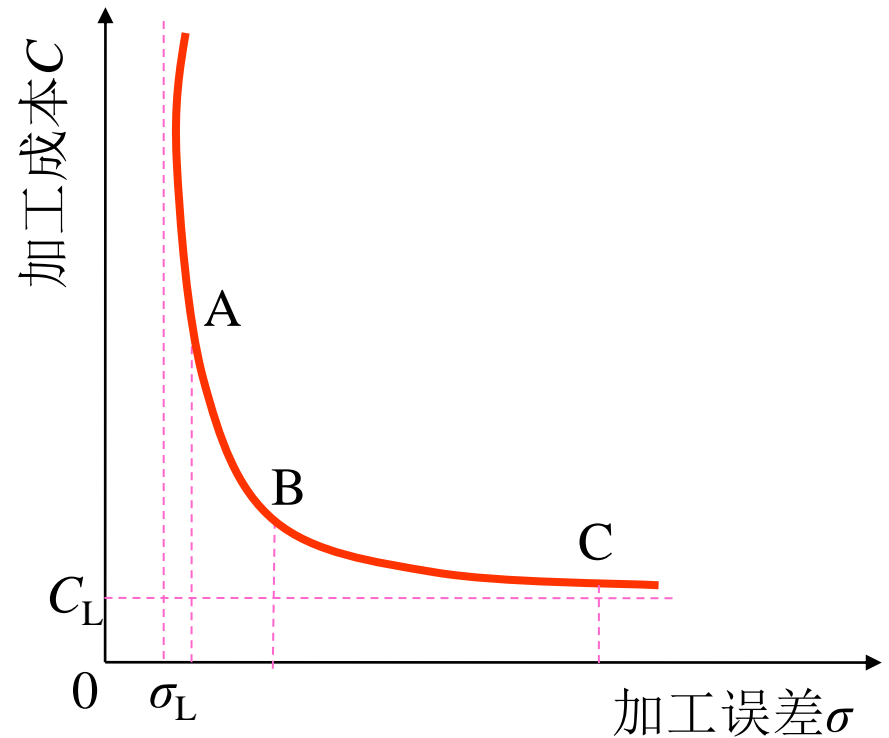


非接触三坐标测量仪

加工经济精度

在生产的过程中不一定精度越高越好，因为还需要考虑其经济性方面的要求。

在正常加工条件下（采用符合质量标准的设备、工艺装备和标准技术等级的工人、不延长加工时间）所能保证的加工精度，称为**加工经济精度**。



加工误差和加工成本的关系

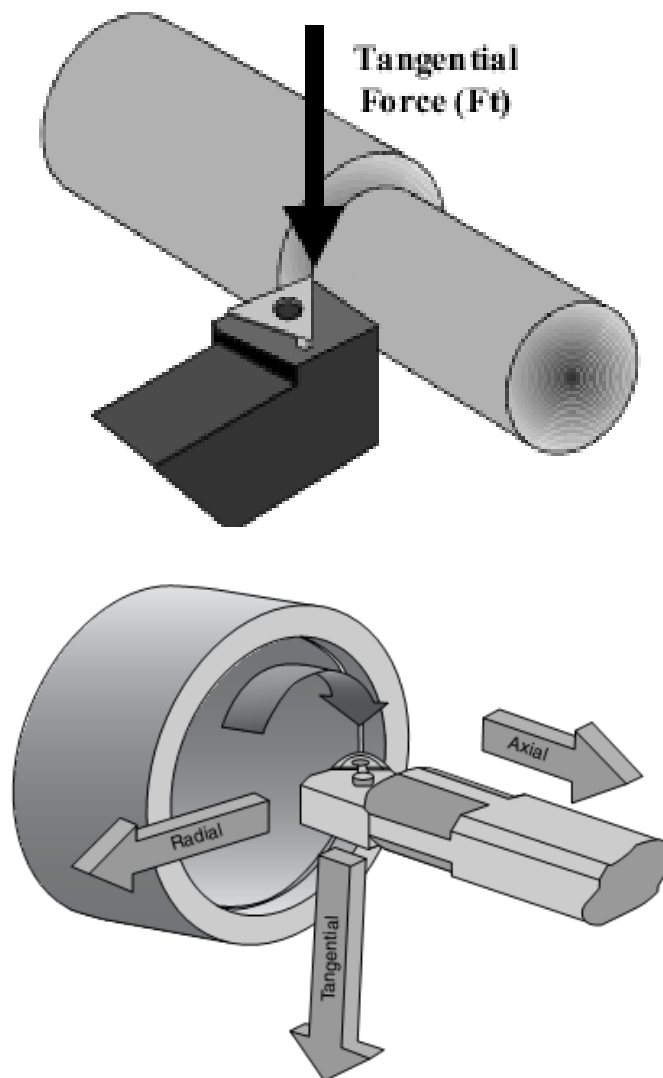
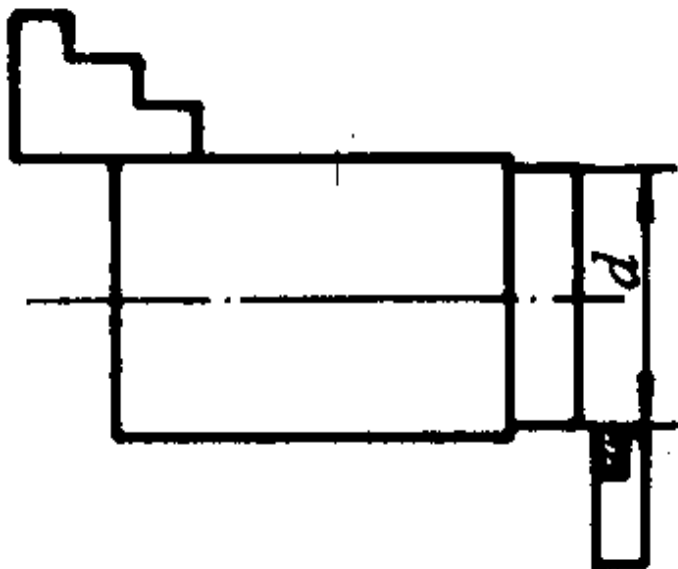
二、获得零件加工精度的方法

Methods of obtaining machining accuracy

1. 获得零件尺寸精度的基本方法有哪些？

Methods of obtaining dimensional accuracy

- (1) 试切法 (Trial cutting method)
- (2) 定尺寸刀具法 (Sizing tool method)
- (3) 调整法 (Method of adjustment)
- (4) 自动控制法 (Automatic control method)



(1) 试切法
Trial cutting method

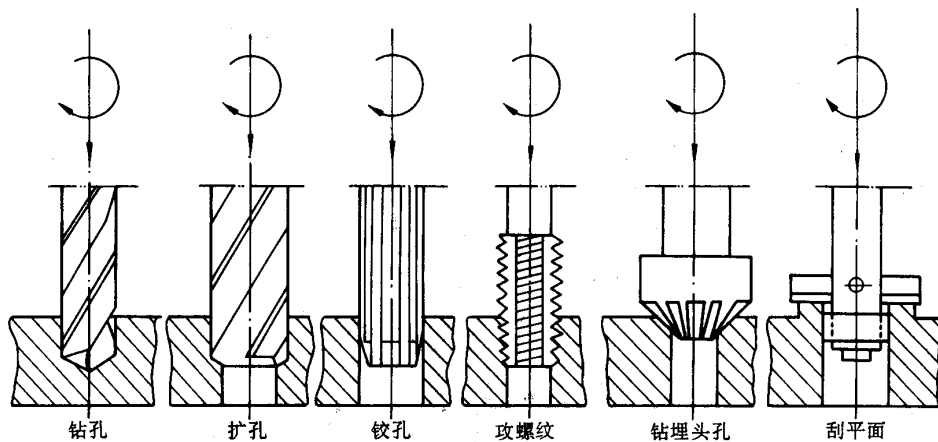


图 3-39 钻床的加工方法

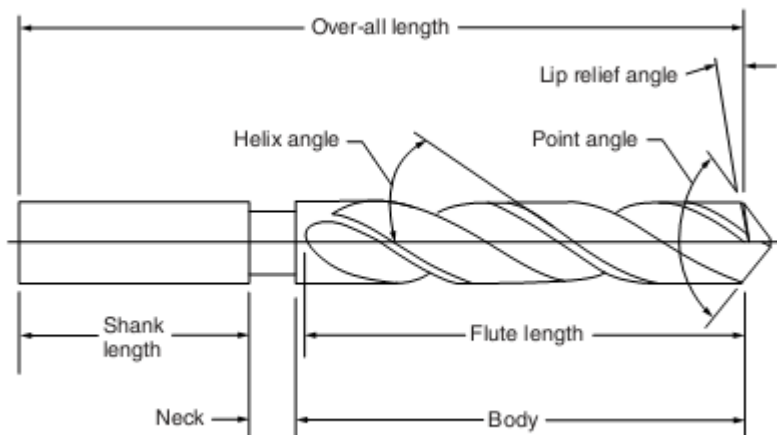
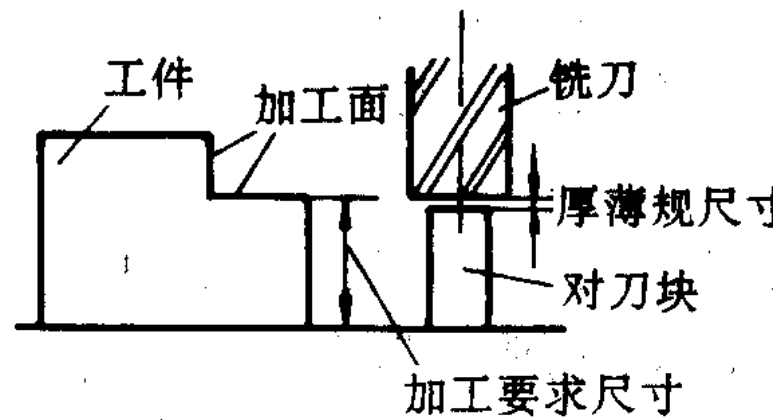
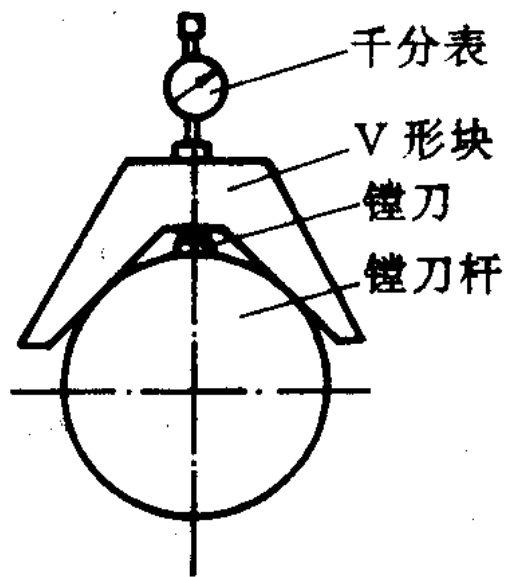


FIGURE 28.1 Drill-1: Twist drill.



FIGURE 29.2 Nonreversing tap driver.

(2) 定尺寸刀具法 Sizing tool method



(3) 调整法 Method of adjustment

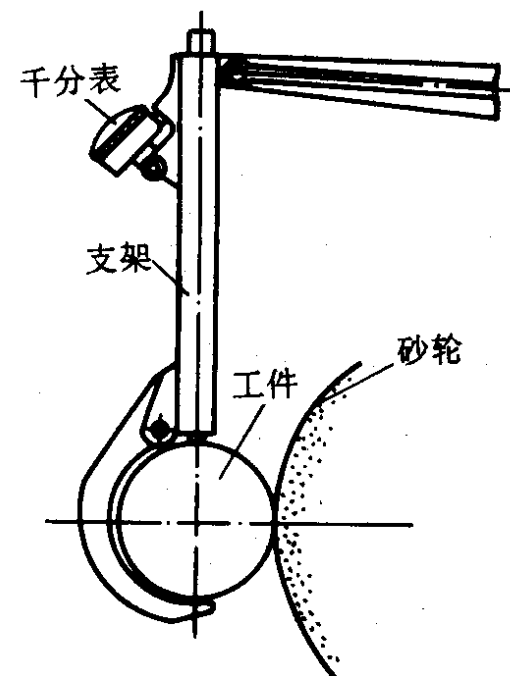
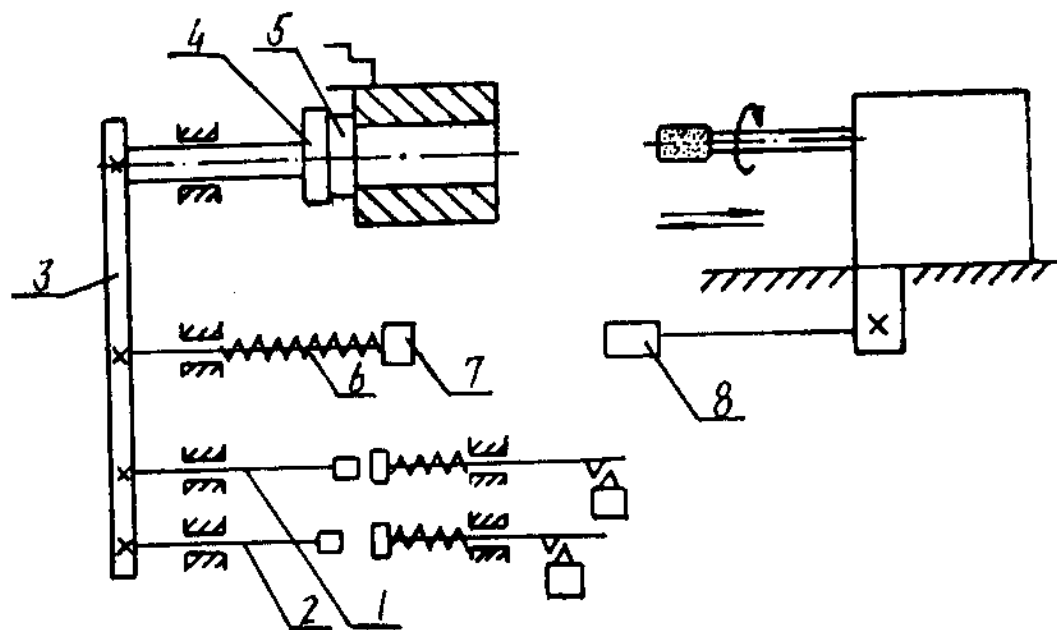


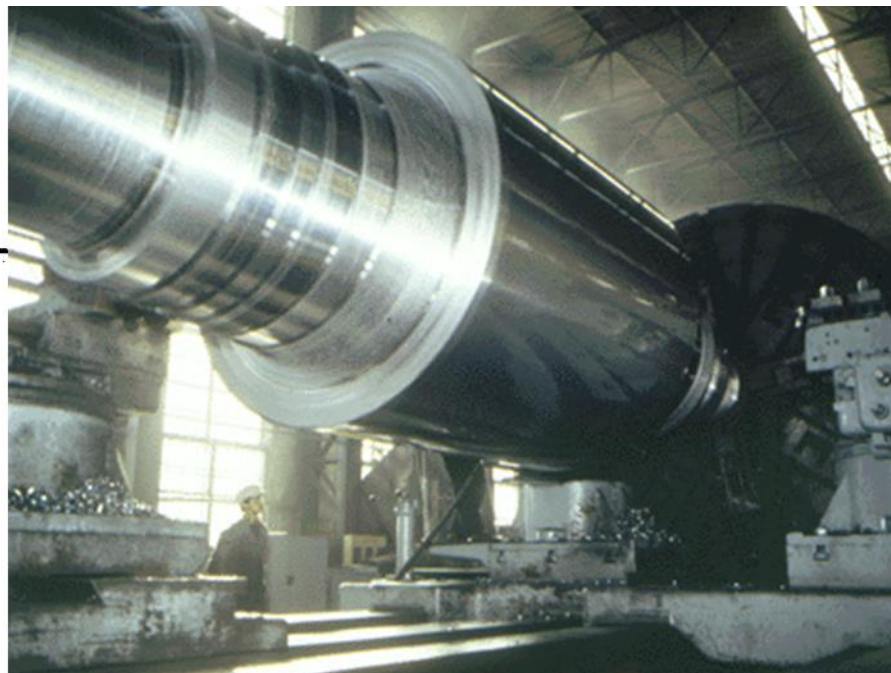
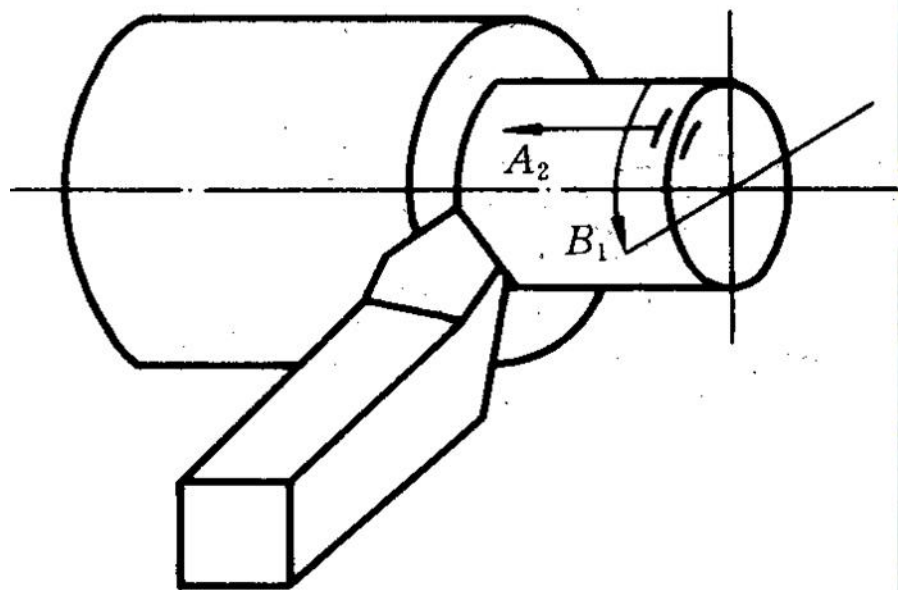
图 6-4 主动测量法

(4) 自动控制法 Automatic control method

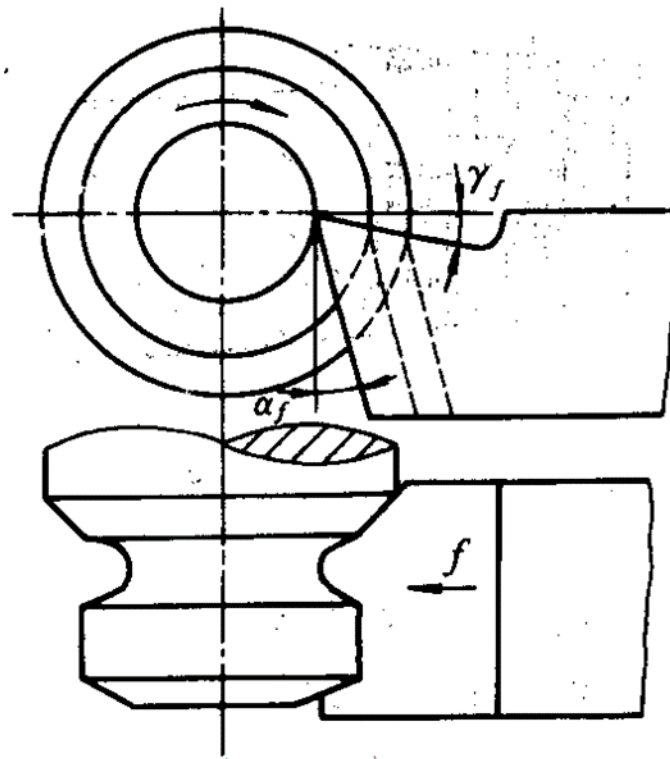
2. 获得零件形状精度的基本方法有哪些？

Methods of obtaining shape accuracy

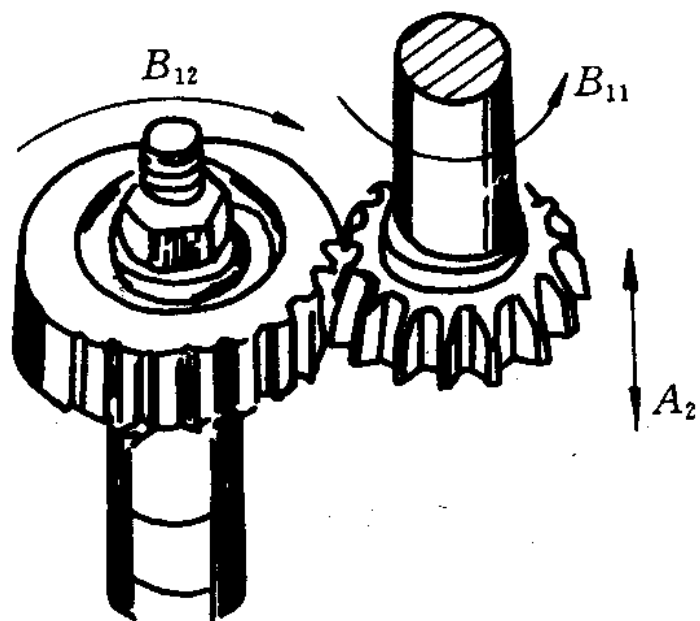
- (1) 轨迹法 (Trajectory method)
- (2) 成形法 (Forming method)
- (3) 展成法 (Generating method)



(1) 轨迹法
Trajectory method



(2) 成形法
Forming method



滚刀进给方向

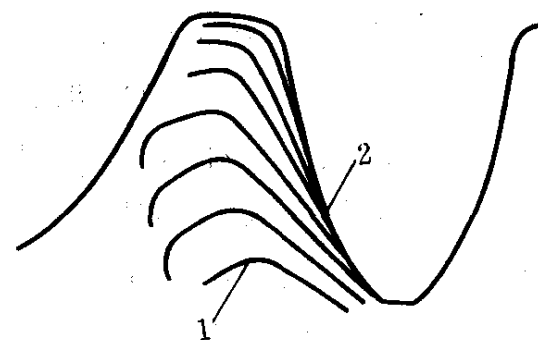
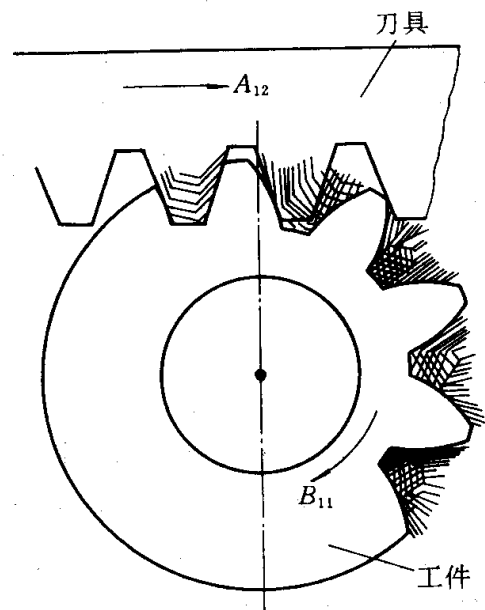
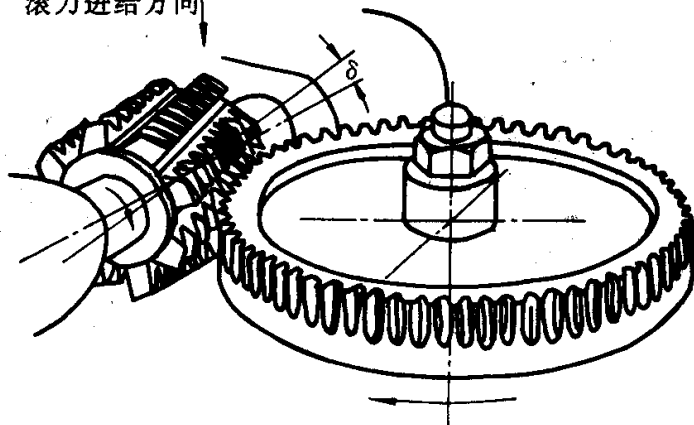


图 1-5 由刀刃包络形成渐开线齿形

(3) 展成法 (滚切法)

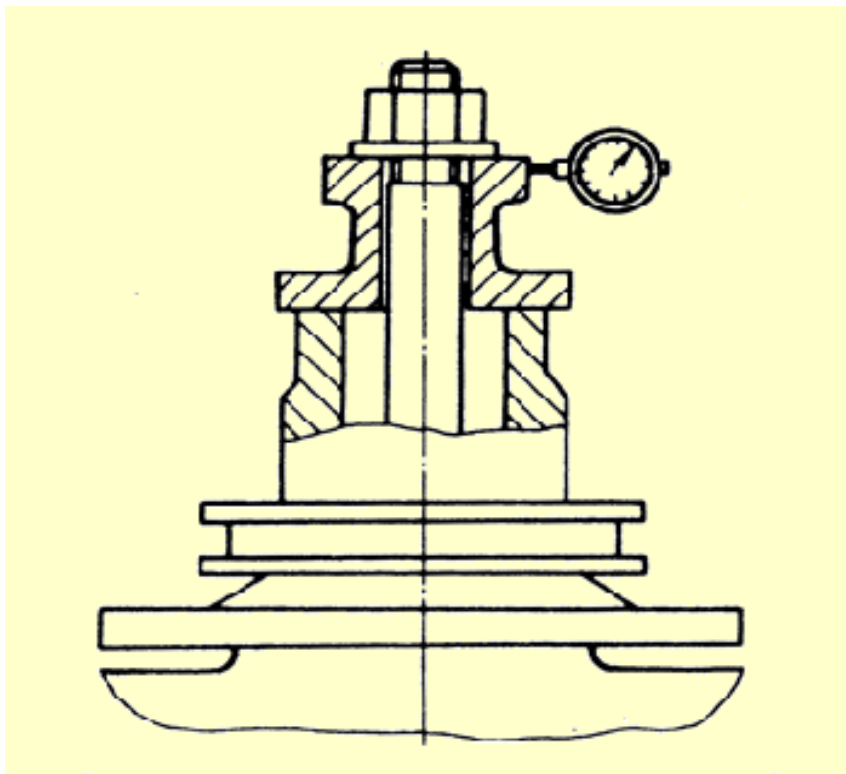
Generating method

3. 获得位置精度的方法有哪些？

Methods of obtaining positional accuracy

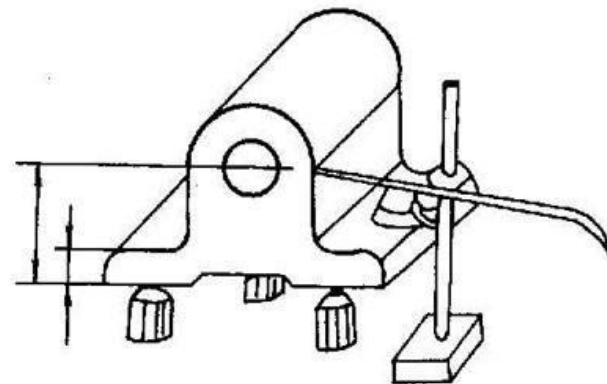
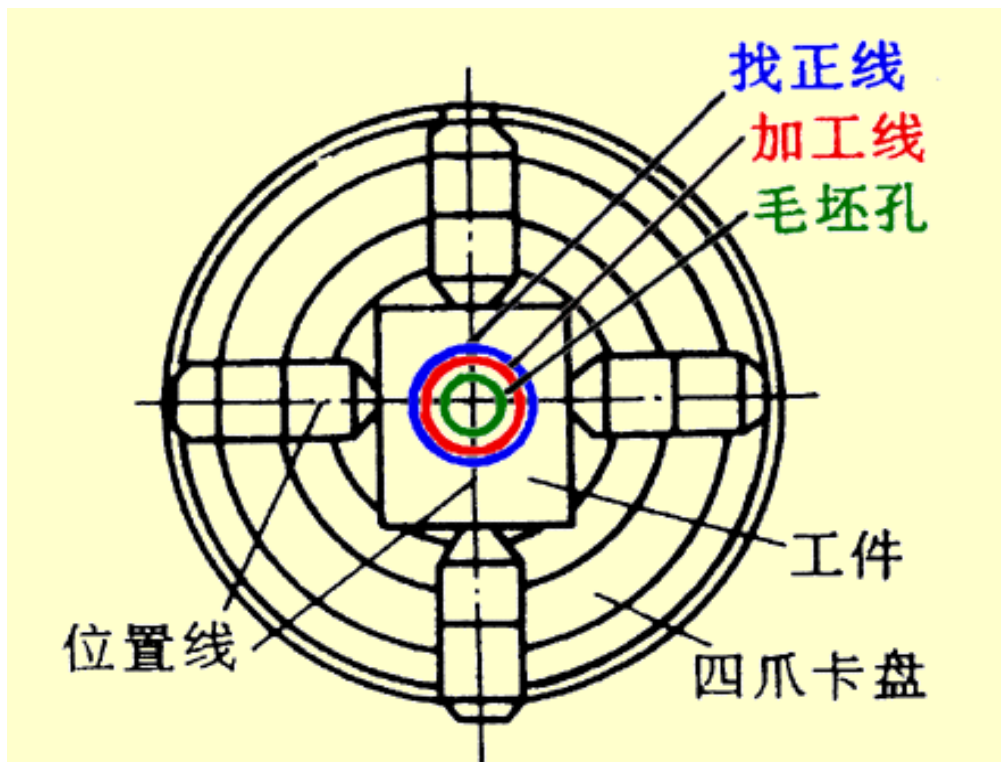
- (1) 直接装夹法 (Direct clamping method)
- (2) 找正装夹法 (Adjustment clamping method)
- (3) 夹具装夹法 (Fixture clamp method)

直接装夹法就是利用千分表、划针、直尺等工具直接找正某些表面，以保证被加工表面位置的精度。



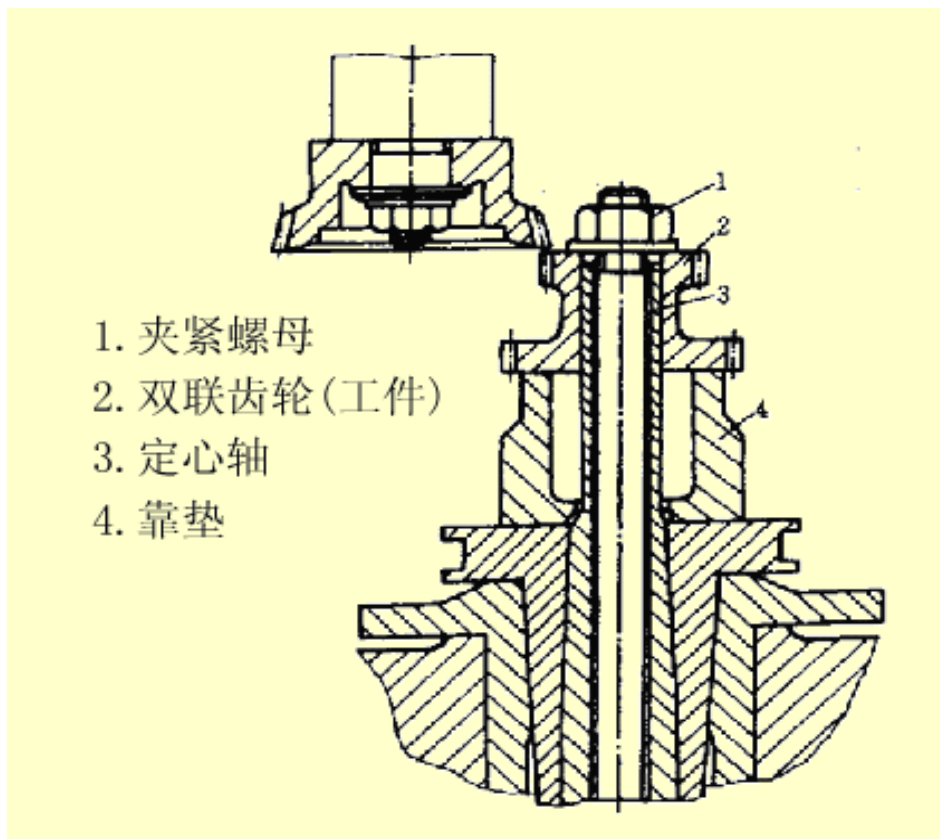
(1) 直接装夹法
Direct clamping method

找正装夹法就是在切削加工前，先在工件的待加工处画线，然后按所划线进行找正定位的方法。找正后用通用夹具夹紧。此种方法多用于单件小批生产。



(2) 找正装夹法
Adjustment clamping method

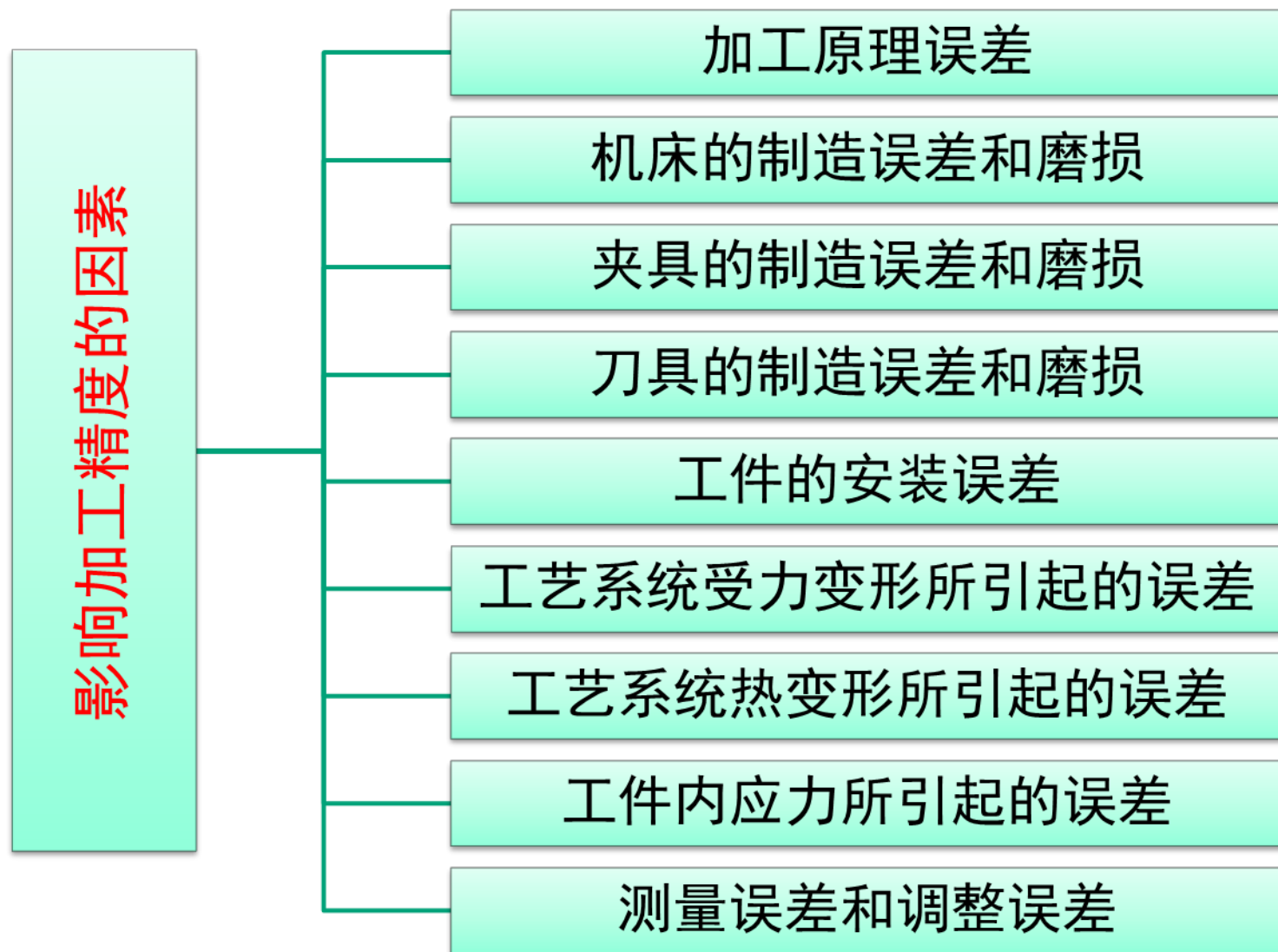
利用**夹具**对工件进行定位、夹紧的方法。这种方法方便、迅速、精度高，广泛应用于成批生产和大量生产。



(3) 夹具装夹法
Fixture clamp method

第二节 影响加工精度的因素及其分析

Part 2 Factors that influence the machining accuracy



一、加工原理误差

The errors from machining methods

1、定义：在加工过程中采用了近似的刀刃形状或成形运动代替理论的刀刃或成形运动而产生的。

The theoretical errors come from using approximate tool shape or movement.

2、实例：齿轮滚刀 (Gear Hobber)。

(1) 齿形-阿基米德螺线 (Archimedes spiral)代替渐开线 (involute);

(2) 齿数有限代替无限光滑。

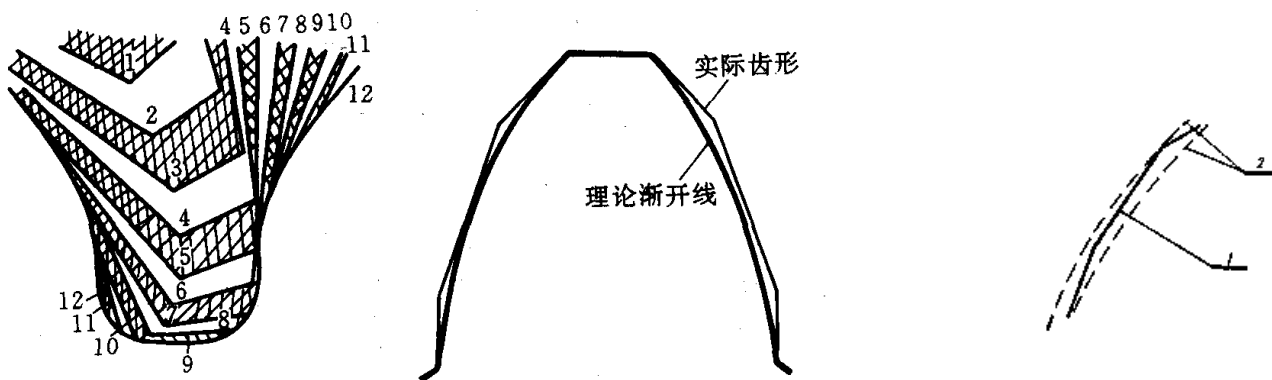
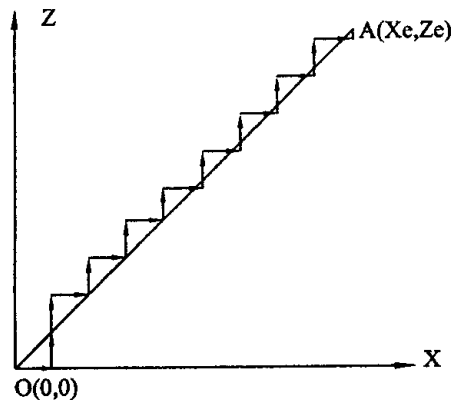


图 6-5 用展成法切削齿轮时的齿形误差



(3) 空间直线插补法(Spatial linear interpolation method)。



(4) 模数铣刀 (module-milling cutter)

表 6-1 模数铣刀加工齿数范围

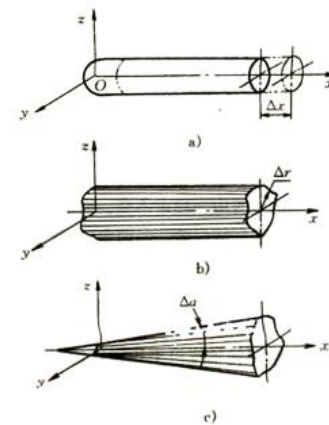
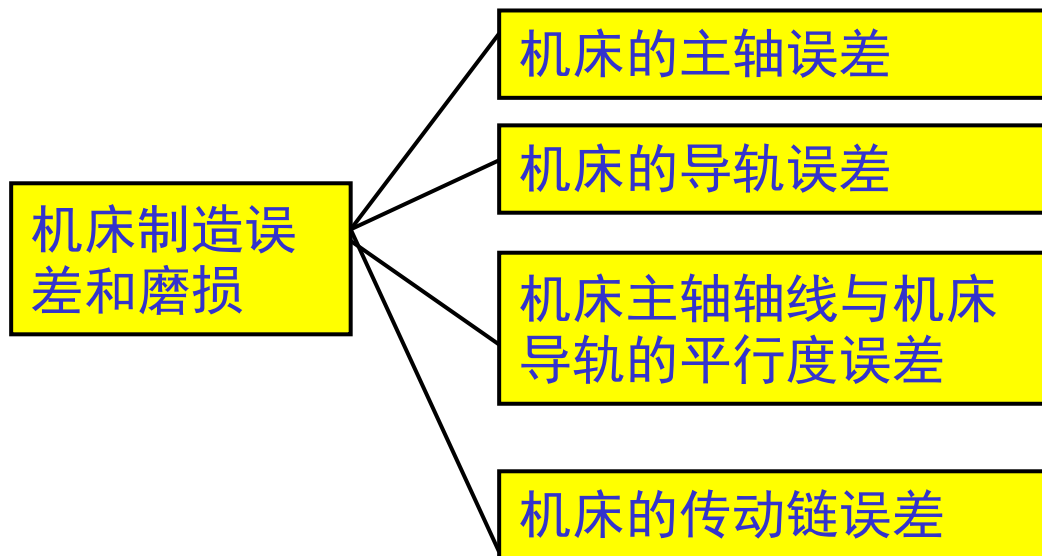
刀 号	1	2	3	4	5	6	7	8
加工齿数范围	12~13	14~16	17~20	21~25	26~34	35~54	55~134	135 以上 及齿条
齿 形								

3、不能认为所有加工原理误差都是不完善的加工方法。

4、加工原理误差一般应小于工件公差的10%~15%。

二、机床的制造误差和磨损

The manufacturing errors and wear of machine tool

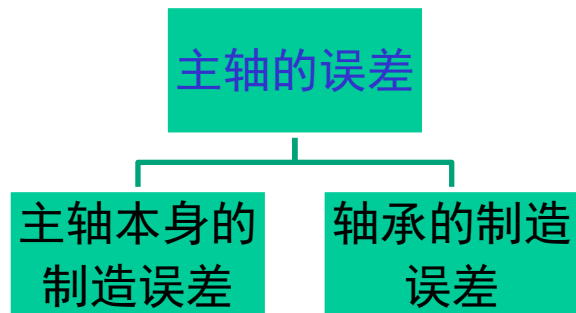


1、机床的主轴误差

The errors from main shaft

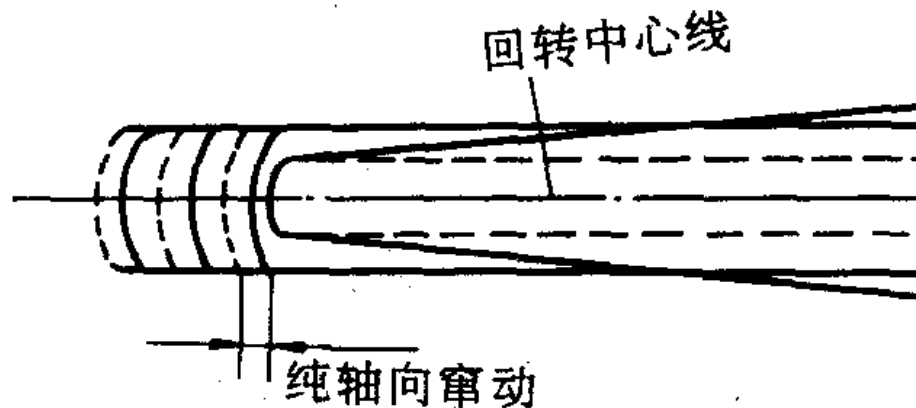
① 主轴的制造误差来源

The sources of errors

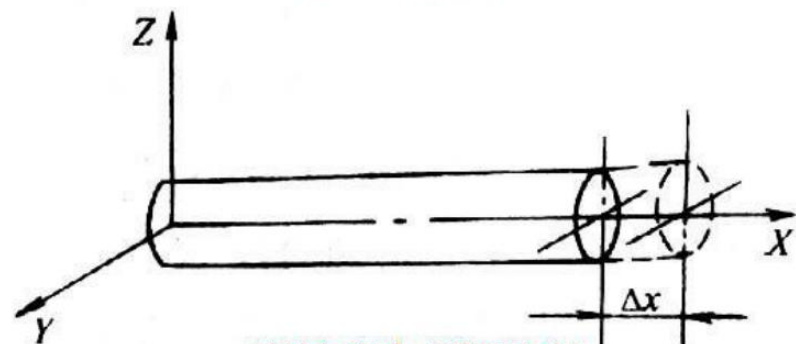


②主轴回转误差的三种基本形式

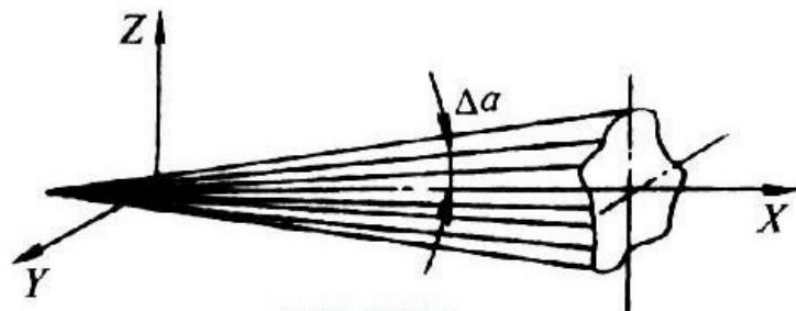
Three basic forms



纯径向跳动



纯轴向窜动 (端面跳动)



纯角度摆动

③主轴回转误差对精度的影响

Effects of errors on the accuracy of the spindle rotation

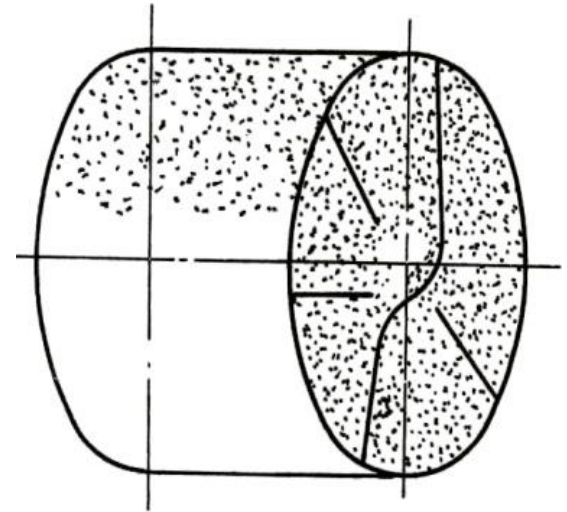
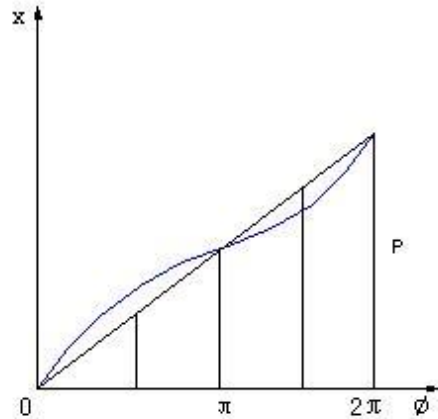
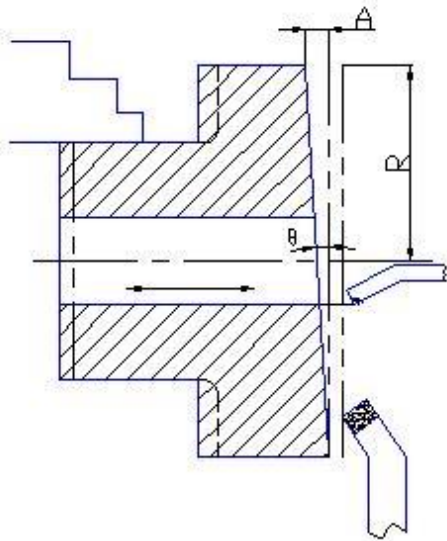


图6-3 主轴纯轴向窜动
a) 工件端面与轴线不垂直 b) 螺纹导程周期误差

主轴轴向窜动
对端面加工的影响

纯轴向窜动
Pure axial shifting

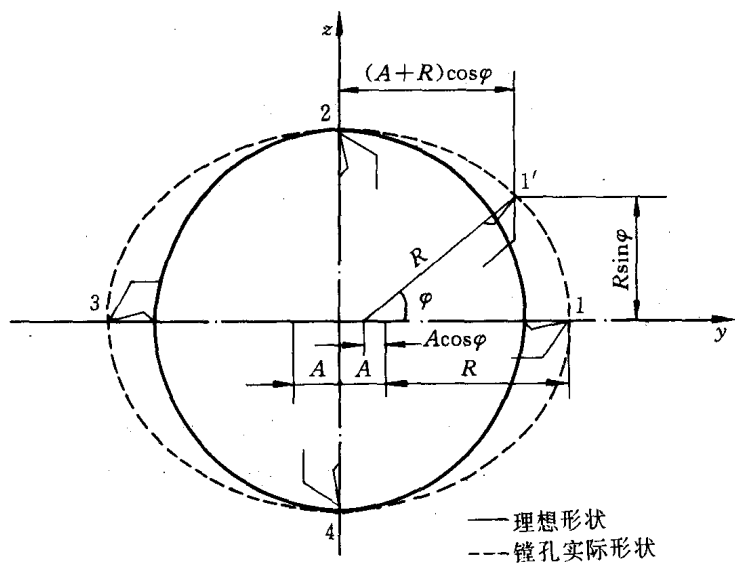


图 6-8 纯径向跳动对镗孔圆度的影响

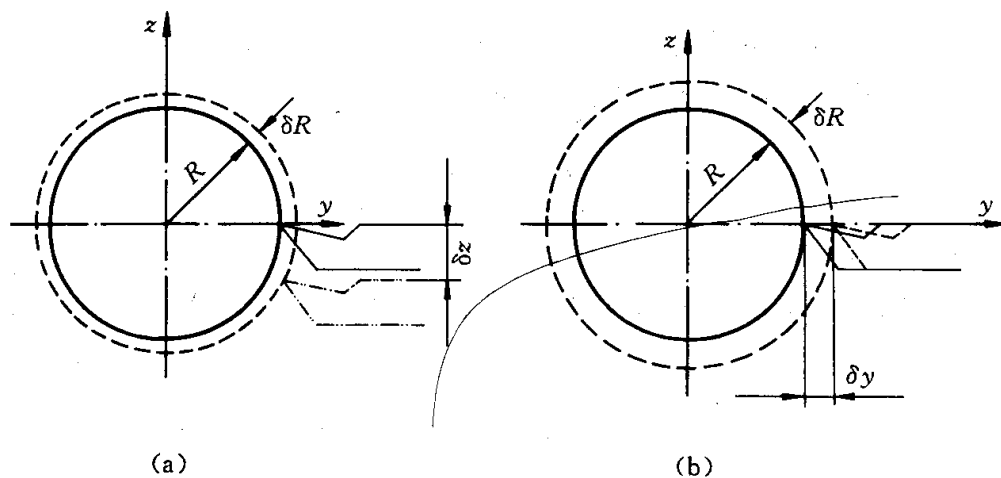
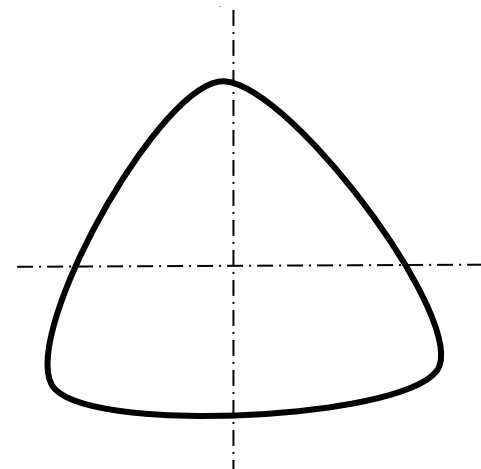
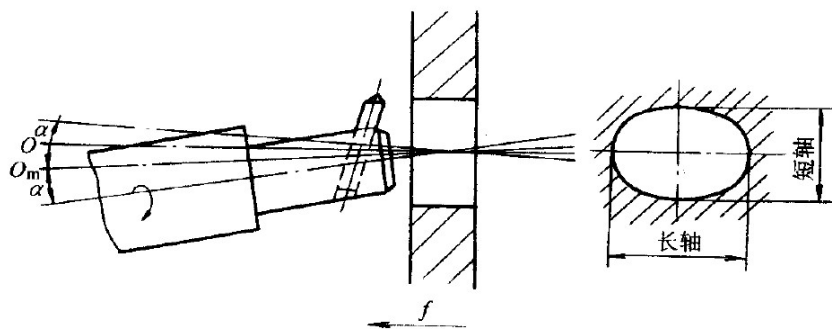


图 6-9 纯径向跳动对车削圆度的影响

纯径向圆跳动
Pure radial movement





纯角度摆动对镗孔的影响

O—工件孔轴心线 O_m —主轴回转轴心线

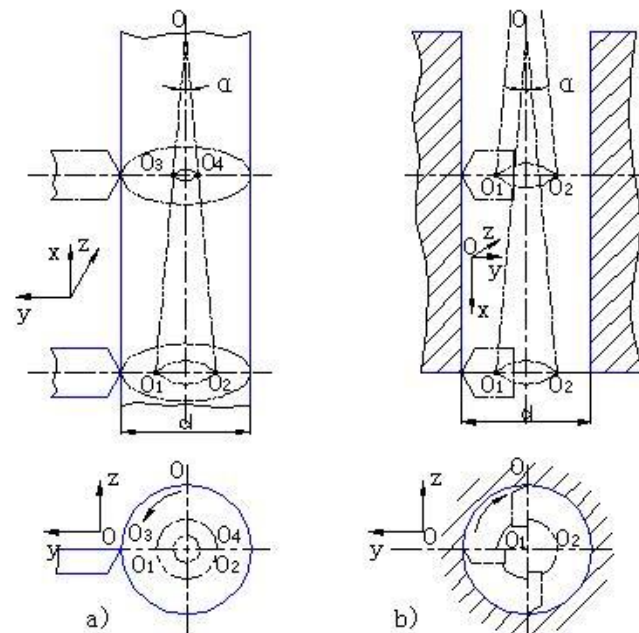


图6-6 主轴纯角度摆动的第二种情况

a) 车削外圆
b) 镗孔

情况一，平面摆动：
车，圆；镗，椭圆。

情况二，锥角摆动：主轴轴线绕其
平均轴线沿圆锥轨迹公转
车，正圆锥；镗，正圆锥

纯角度摆动
Pure angular sway

④加工方式对精度的影响

Effects of processing methods on the accuracy

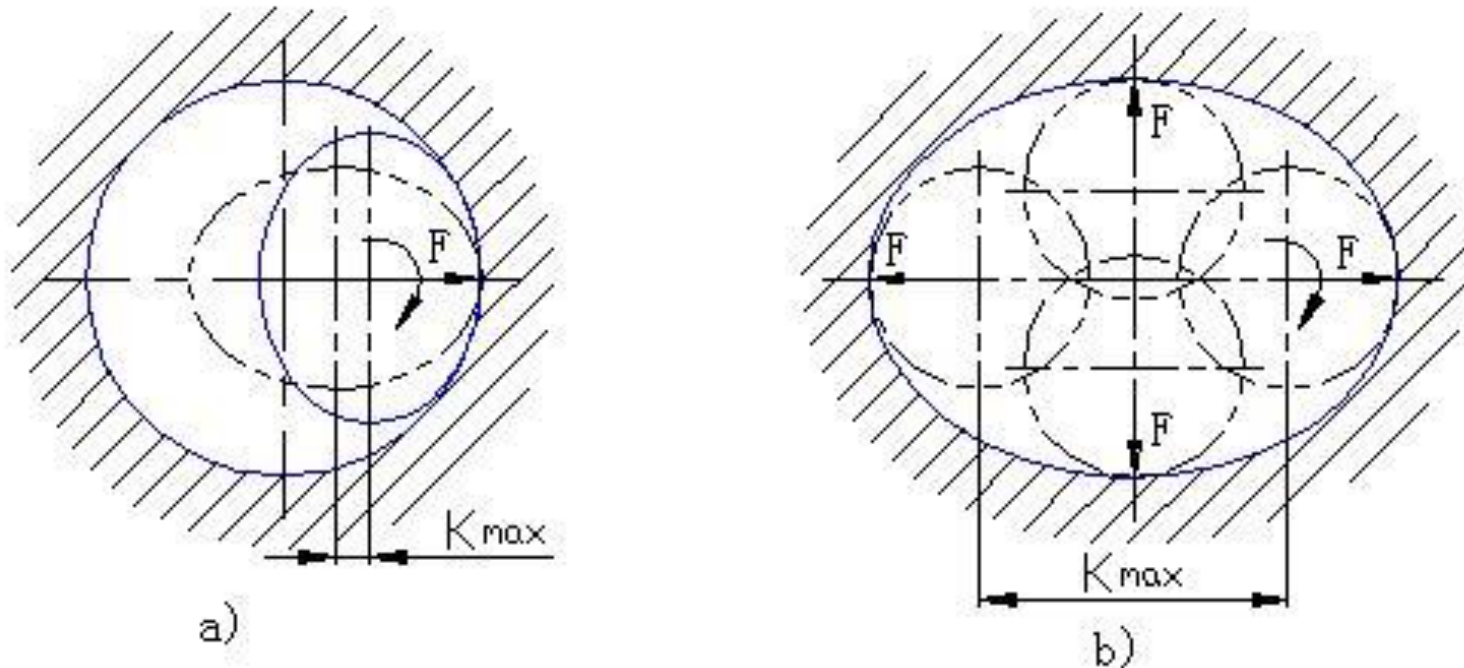


图6-7 主轴采用滑动轴承的径向圆跳动

a) 工件回转类机床 b) 刀具回转类机床

K_{max} -最大跳动量

车、磨类：轴颈误差为主，轴承孔无影响；

镗类：轴颈无影响，轴承孔为主。

提高主轴回转精度的措施

Methods to improve the accuracy of the spindle rotation

- 适当提高主轴及箱体的制造精度；
- 选用高精度轴承；
- 提高主轴部件的装配精度；
- 对高速主轴部件进行平衡；
- 对轴承进行预紧。

2. 机床导轨误差

Lathe guide errors

机床导轨的3种误差形式：

- (1) 水平面内直线度误差；
- (2) 垂直面内的直线度误差；
- (3) 前后导轨在垂直面内的平行度误差。

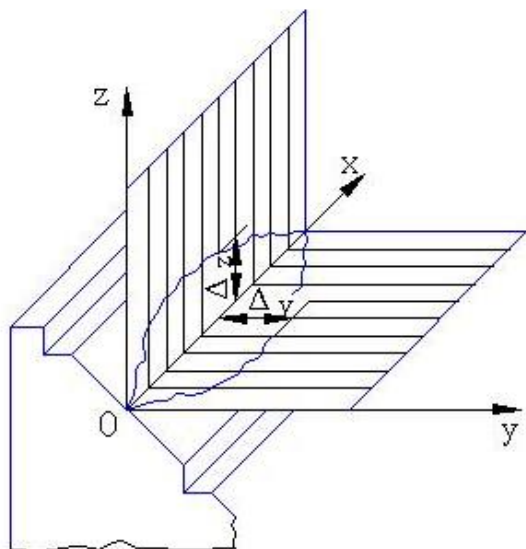


图6-9 导轨的直线度

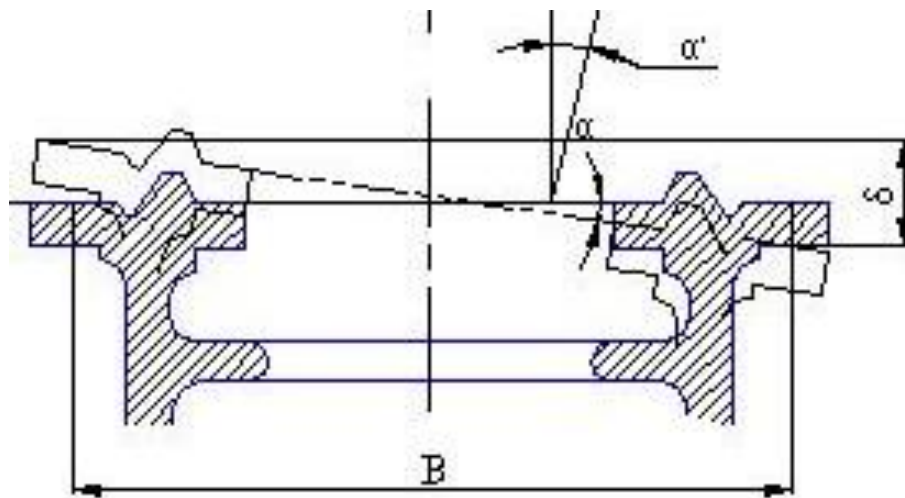
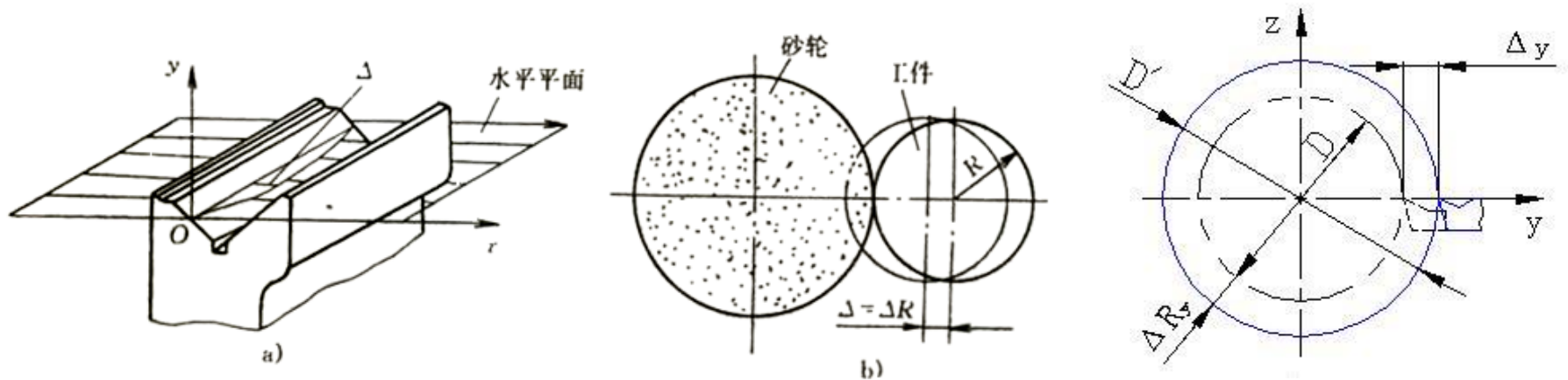


图6-11 车床导轨扭曲引起的加工误差

（1）在水平面内的直线度误差：

Straightness error in the horizontal plane

- 引起鞍形或鼓形误差
- 是敏感方向：影响尺寸误差和形状误差。
- 如车、磨床。



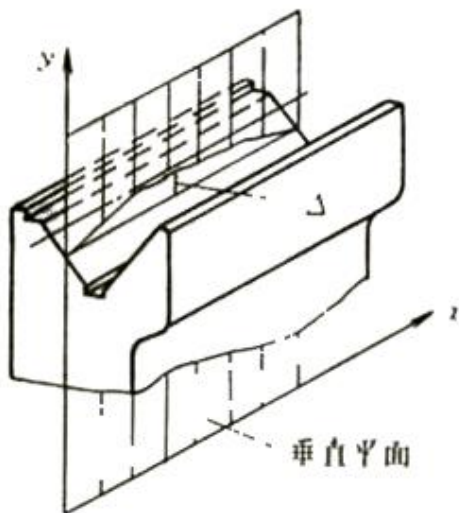
磨床导轨在水平面内的直线度误差：a) 水平面内的误差，b) 工件产生的误差

车床导轨在水平面内的直线度误差对车削圆柱面精度的影响

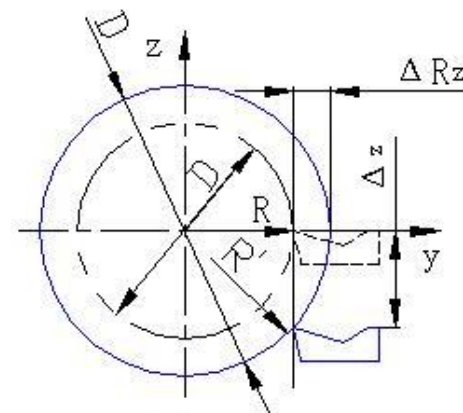
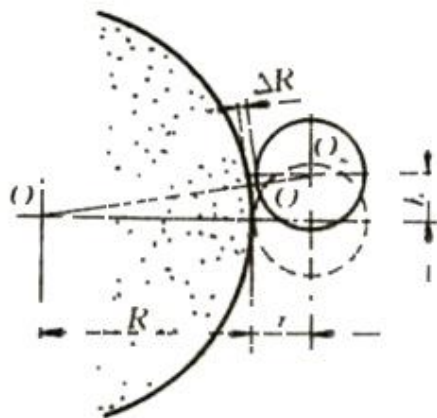
(2) 垂直面内的直线度误差:

Straightness error in the vertical plane

- 一般影响很小
- 车、磨床：非敏感方向，影响很少；
- 铣、刨、平磨：敏感方向，影响大（尺寸、形状）。



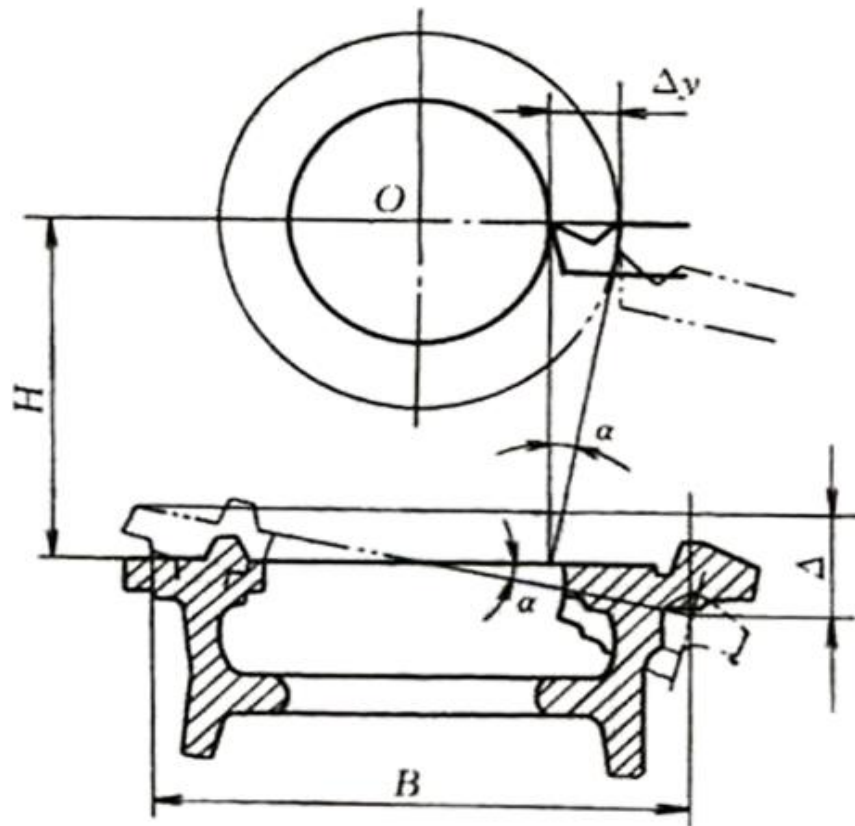
磨床导轨在垂直面内的直线度误差：a) 垂直面内的误差，b) 工件产生的误差



车床导轨在垂直面内的直线度误差对车削圆柱面精度的影响

(3) 前后导轨平行度（扭曲）：

Parallelism between two guide-ways



车床导轨的扭曲

$$\Delta y = \Delta \frac{H}{B}$$

提高直线运动精度的措施?

- 提高机床导轨、溜板（滑座）的制造及装配精度；
- 提高导轨的耐磨性
 - 采用耐磨合金铸铁、镶钢导轨、贴塑导轨、滚动导轨、静压导轨、导轨表面淬火等；
- 机床安装正确，地基牢固
 - 严格测量、校正，定期复校和调整。

3. 主轴轴线与机床导轨的平行度误差

Parallelism between spindle and machine guide-ways

(1) 当主轴回转轴线与导轨在水平面内不平行时加工表面成圆锥形

(2) 当主轴回转轴线与导轨在垂直面内不平行时加工表面成双曲面体

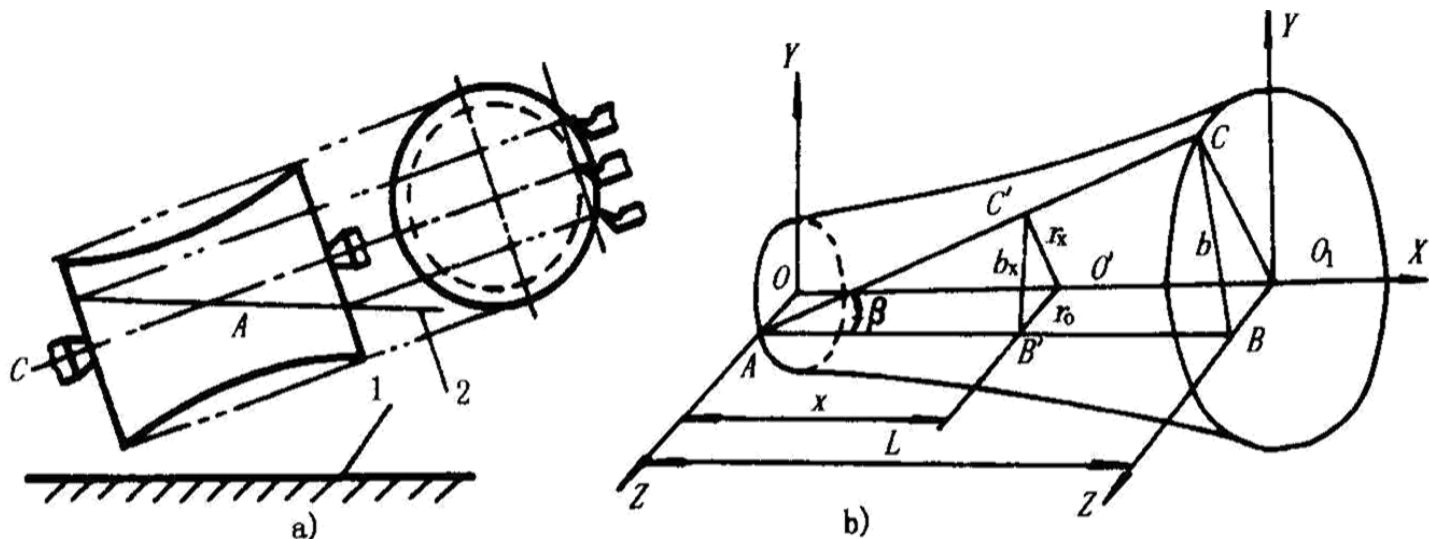
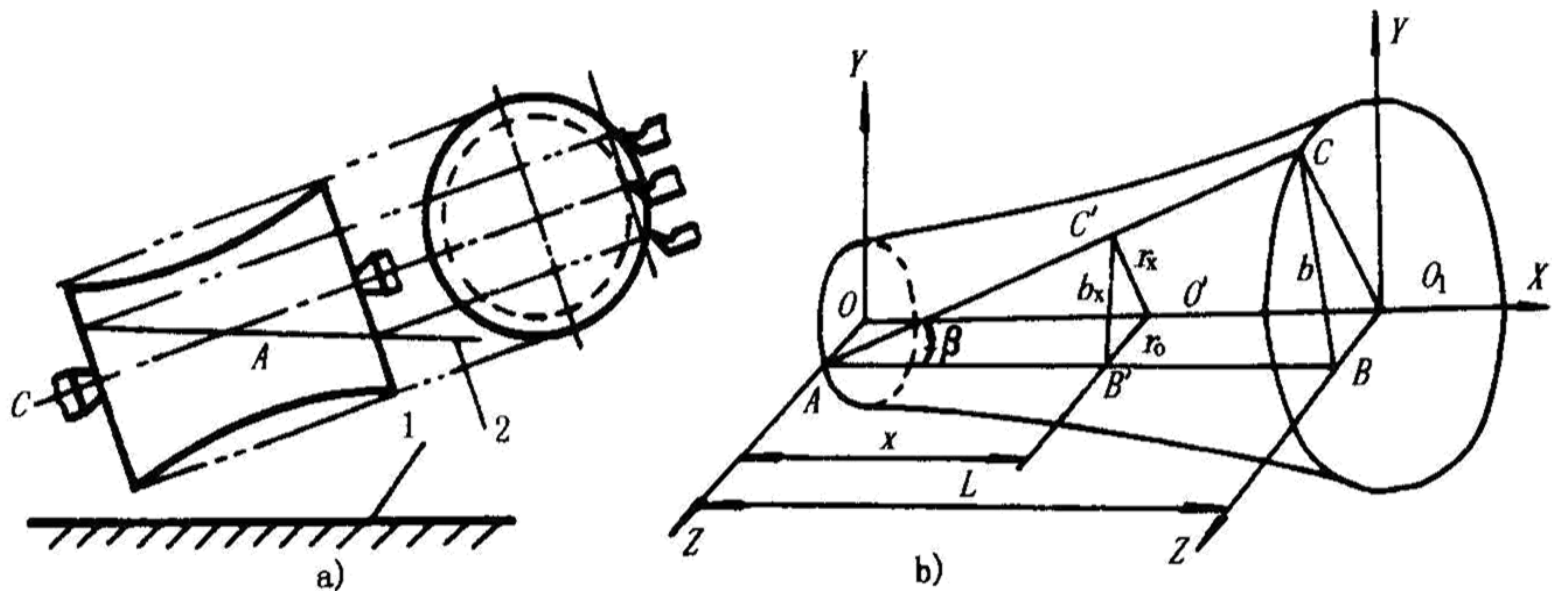


图 2-16 车床主轴回转轴线与导轨在垂直

1-导轨面;2-刀尖运动



车床主轴回转轴线与导轨在垂直面内的平行度误差
1—导轨面；2—刀尖运动

$$r_x^2 = r_0^2 + x^2 \tan^2 \beta$$

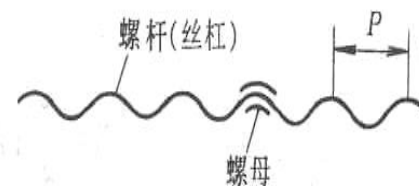
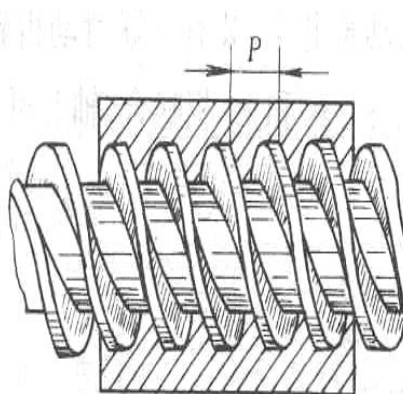
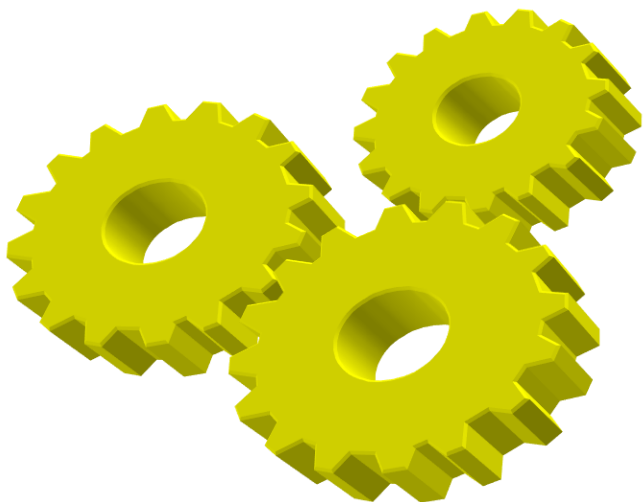
$$r_x^2 = r_0^2 + x^2 \frac{b^2}{L^2}$$

$$\frac{r_x^2}{r_0^2} - \frac{x^2 b^2}{r_0^2 L^2} = 1$$

4、机床传动链的误差

The transmission chain error of machine tool

(1) 指传动链始末两端传动元件间相对运动的误差。



丝杠螺母传动

(2) 传动精度是由链中零件的制造和装配精度决定的。**末端元件对传动链精度影响最大。**

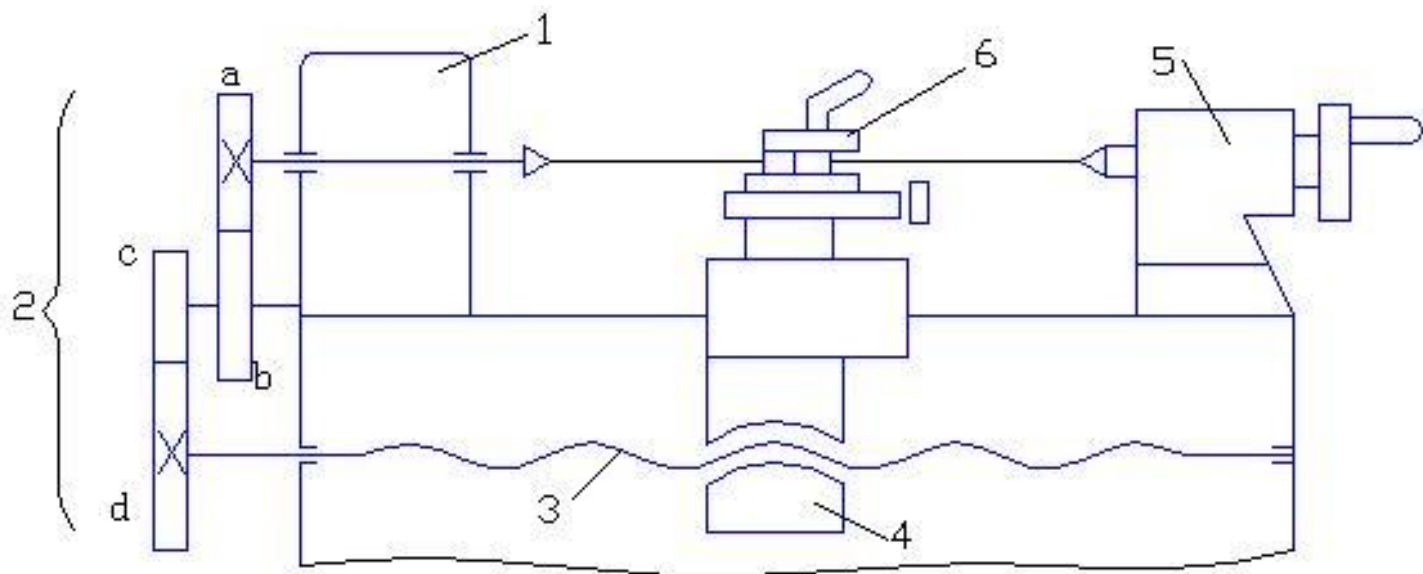


图6-12 丝杠车床传动系统

1-主轴箱 2-挂轮 3-丝杠 4-螺母 5-尾座 6-刀架

(3) 减少误差措施？

减少传动链带来的误差

- 减少传动链中元件数目，缩短传动链，从而减少误差来源；
- 提高传动件的制造和装配精度；
- 消除间隙。

三、夹具的制造误差和磨损

The manufacturing errors and wear of fixture)

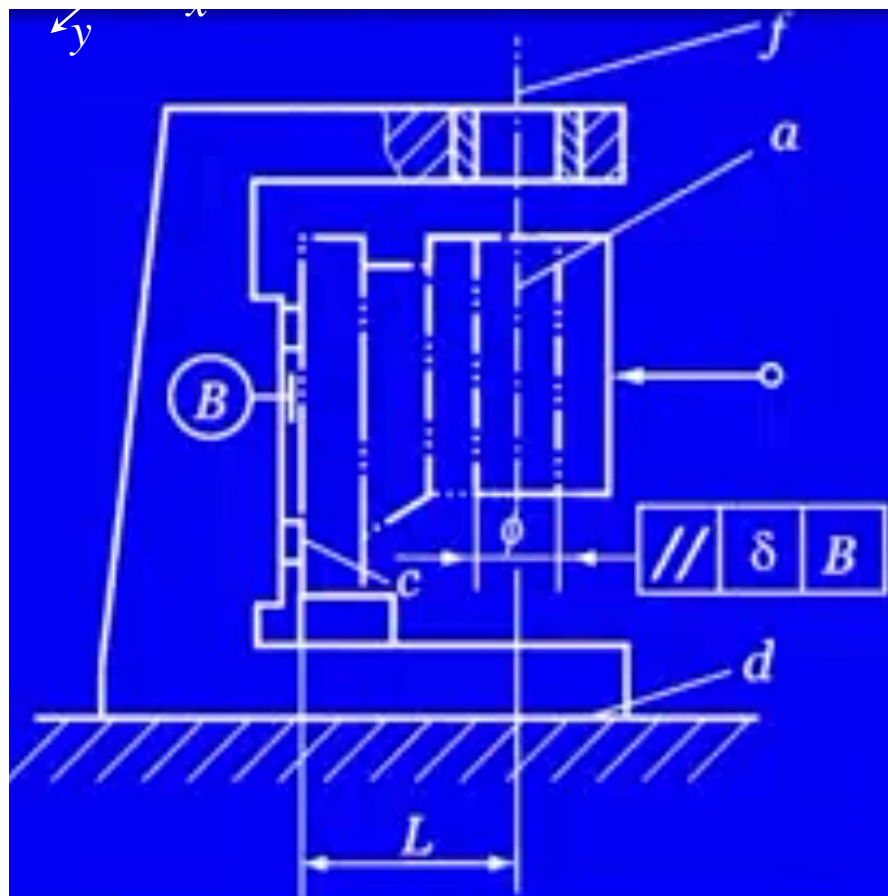
①夹具作用：使工件相对于刀具和机床具有正确的位置，因此夹具的制造误差对工件的加工精度（特别是位置精度）有很大影响。

②误差来源：包括定位元件、刀具引导件、分度机构、夹具体的制造误差、装配误差和使用中的磨损。

夹具的哪些制造误差会对零件的加工精度有影响？

例：使用钻模钻孔

- 钻套轴心线至夹具定位平面的距离误差；
- 钻套轴心线与夹具定位面的平行度误差；
- 夹具定位平面与夹具体底面的垂直度误差；
- 钻套孔的直径误差。



工件在夹具中装夹示意图

减少夹具带来的误差

- 设计制造夹具时严格规定公差，控制制造误差；
- 采用耐磨材料；
- 采用可拆卸机构，使易磨夹具元件磨损到一定程度时可及时更换。

四、刀具的制造误差和磨损

The manufacturing errors and wear of cutting tool

1、误差来源：刀具的制造误差和磨损。

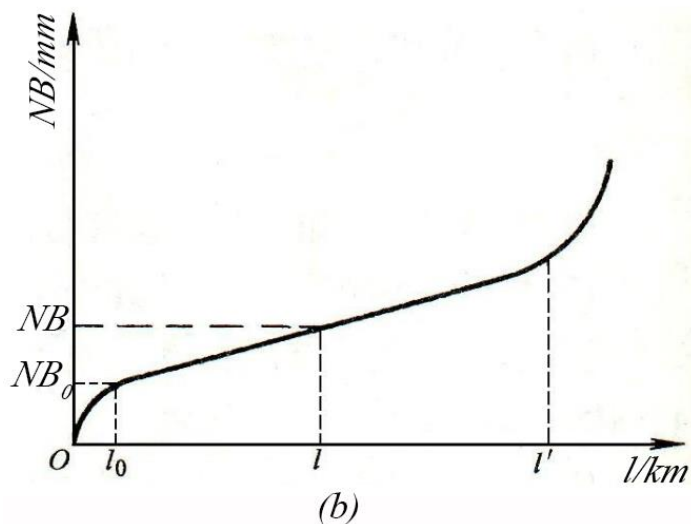
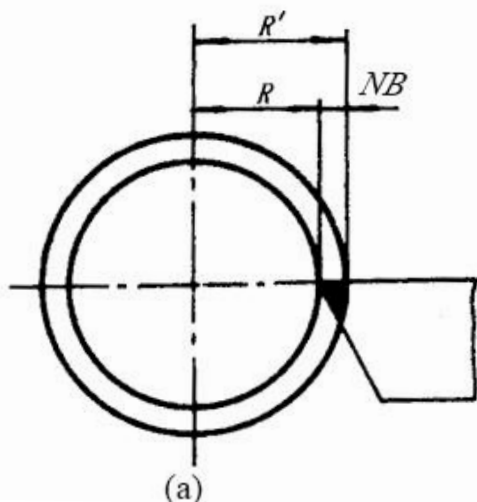
机械加工中常用的刀具：

一般刀具（单刃刀具）

定尺寸刀具（钻头、铰刀、键槽）；

成形刀具（成型车刀、成型铣刀、成型砂轮）；

展成（创成）刀具（齿轮滚刀、花键滚刀）



刀具的尺寸磨损与切削路径的关系

$$NB = NB_0 + \frac{k_{NB}(l - l_0)}{1000} \approx NB_0 + \frac{k_{NB}l}{1000}$$

精车时刀具的初期磨损量 NB_0 和相对磨损量 K_{NB}

工件材料	刀具材料	切削用量			初始磨损 NB_0/mm	相对磨损 $K_{\text{NB}}/\text{mm}\cdot\text{km}^{-1}$
		背吃刀量 a_p/mm	进给量 $f/\text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$	切削速度 $v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$		
45钢	YT60,YT30	0.3	0.1	7.75~8.08	3~4	2.5~2.8
	YT15	<2	<0.3	<1.67~3.33	4~12	8
灰铸铁	YG4	0.5	0.2	1.5	3	8.5
	YG6				5	13
					5	19
	YG8		0.1	1.67	4	13
				2	5	18
				2.33	6	35
合金钢	YT60,YT30	0.5	0.21	2.25	2	2.0~3.5
	YT15				4	8.5
	YG3				5	9.5
	YG4				6	30

2、不同类型的刀具对加工误差的影响是不同的。

- a、定尺寸刀具：将直接影响工件的尺寸和形状精度；
- b、单刃刀具：制造误差对精度没有直接影响；但是使用过程中的磨损会影响工件的尺寸、形状精度。
- c、成形刀具：刀具的形状精度直接决定被加工表面的形状，刀刃形状的制造误差和磨损直接影响工件被加工表面的精度。
- d、展成刀具：刀具的刃口形状及有关尺寸直接影响被加工工件的形状精度。

3、减少误差措施：

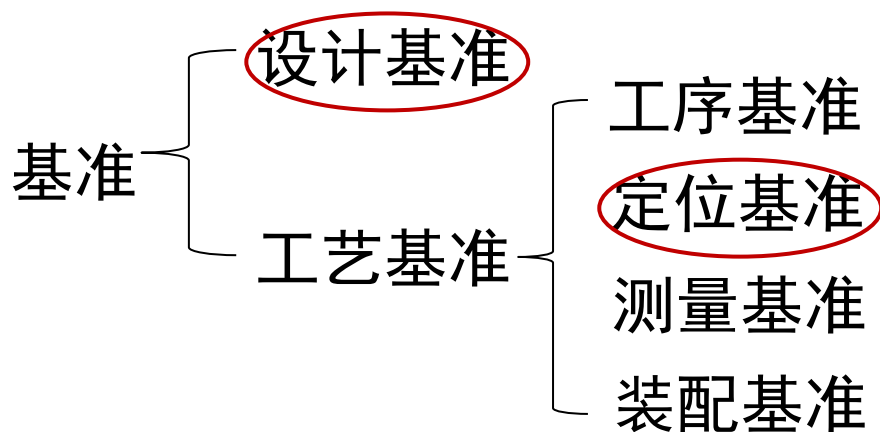
正确地选用刀具材料，合理地选用刀具几何参数和切削用来，正确地刃磨刀具，采用合适的冷却润滑液等，均可有效地减少刀具的尺寸磨损。必要时还可以采用补偿装置对刀具磨损进行自动补偿。

五、工件的装夹误差

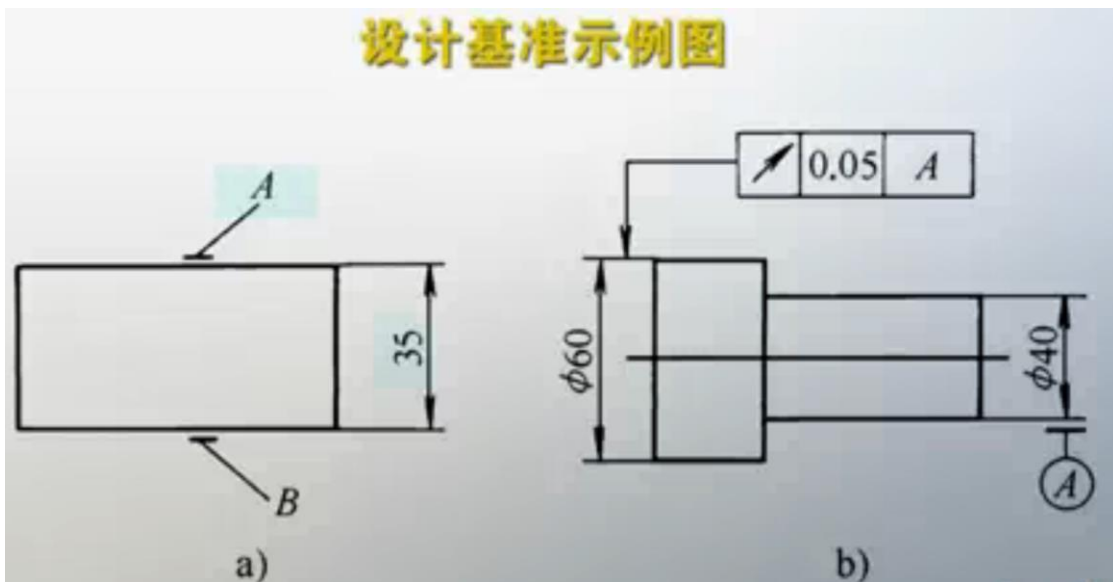
Installation error of work piece

1. 装夹：将工件在机床上或夹具中定位、夹紧的过程；
装夹包括定位和夹紧的整个过程。
2. 装夹误差：与工件在夹具中装夹有关的加工误差；
包括：
 - (1) 定位误差：由于定位不准确所造成的加工误差
 - (2) 夹紧误差：在工件夹紧时由于工件和夹具变形所造成的加工误差。
3. 产生定位误差的原因：
 - (1) 定位基准与设计基准不重合
 - (2) 定位元件和定位基准本身的制造误差。

4、**基准**：用来确定生产对象上几何要素间的几何关系所依据的那些点、线、面。



设计基准示例图



(1) **设计基准**：指设计图样上所采用的基准；

(2) **定位基准**：在加工中用做定位的基准。

5、夹紧误差的来源：

例如着力点及方向不适当、工件的弹性变形、接触变形。

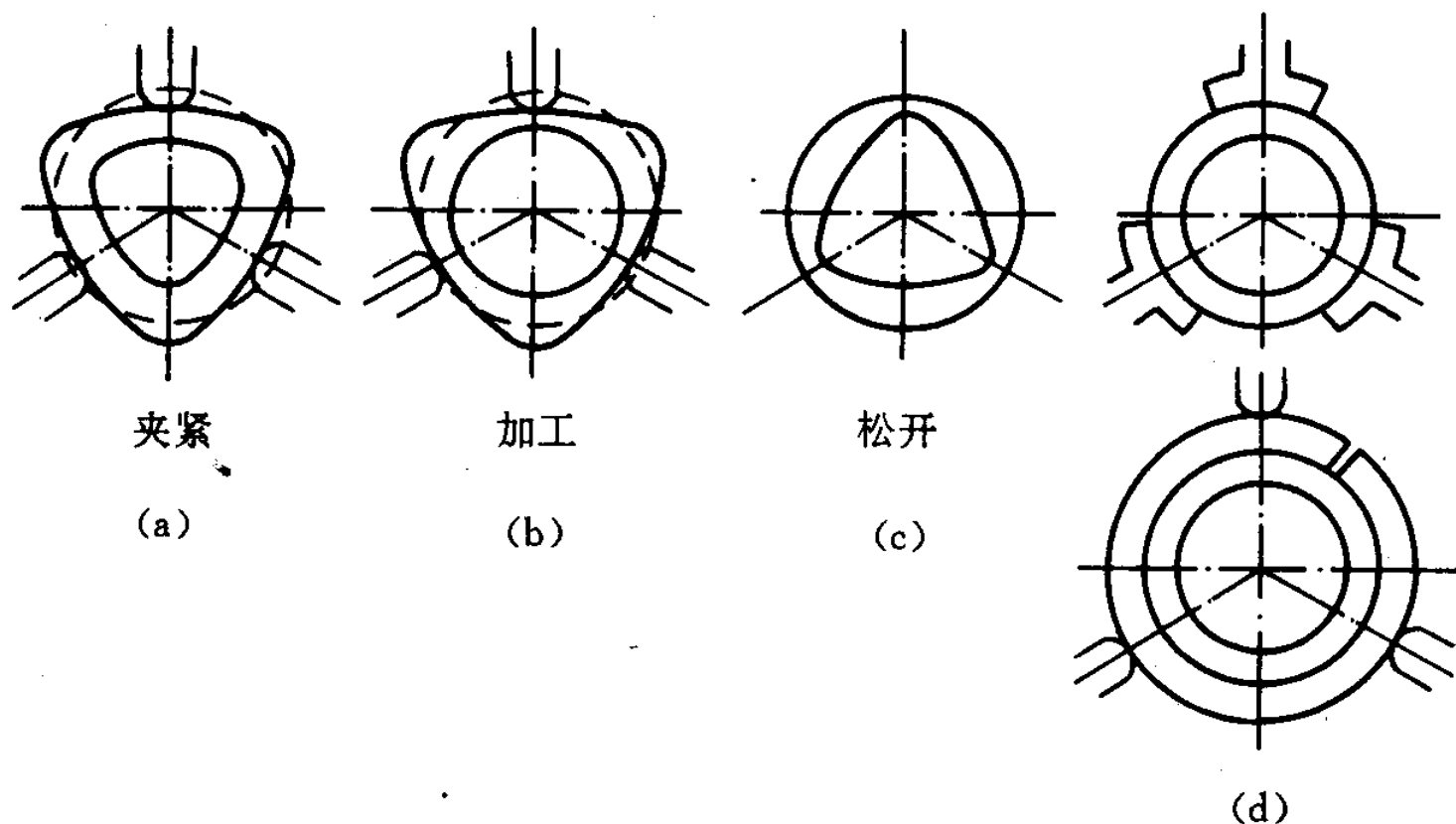


图 6-26 薄壁套筒零件由于夹紧力引起的加工误差

六、工艺系统受力变形所引起的误差

The errors from stress deformation of process system

工艺系统概念：**在机械加工中机床、刀具、夹具和工件的统一体**。它是一个弹性体。



六、工艺系统受力变形所引起的误差

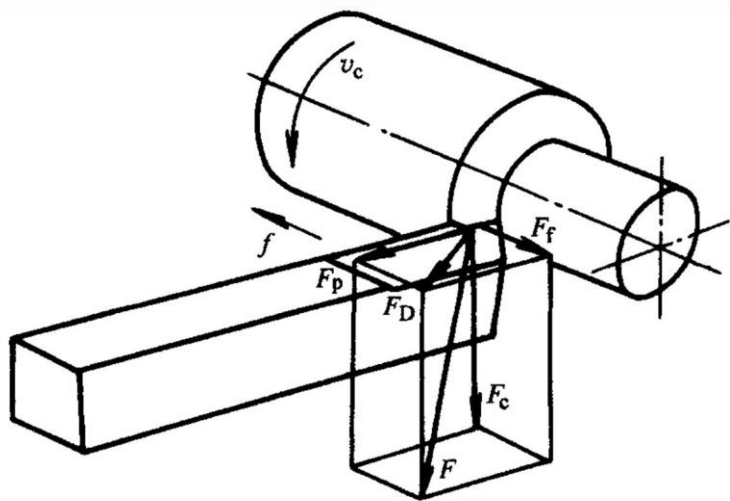
The errors from stress deformation of process system

1、工艺系统刚度的概念

工艺系统刚度 $k_{\text{系}}$ ：垂直作用于工件加工表面（加工误差敏感方向）的径向切削力 F_p 与工艺系统在径向上的变形 y 之间的比值。

$$k_{\text{系}} = \frac{F_p}{y}$$

注： $y = y_{F_f} + y_{F_p} + y_{F_c}$



切削力 F

F_c —主切削力或切向力；

F_f —进给力或轴向力；

F_p —背向力。

负刚度的概念

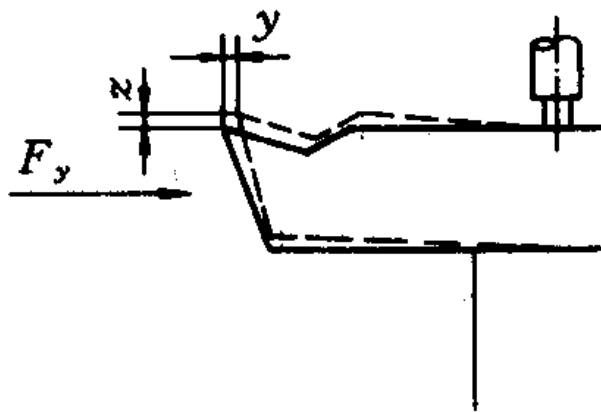


图 6-13 车刀受 F_y 力时同时在 y, z 方向产生变形

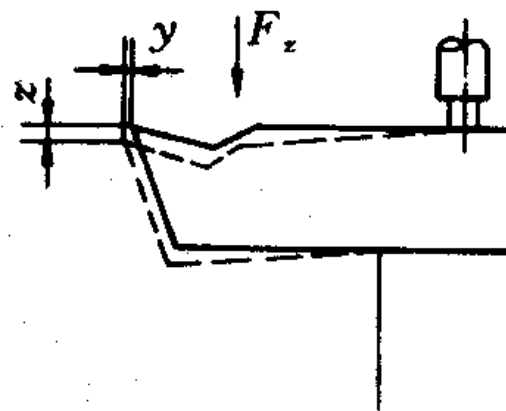
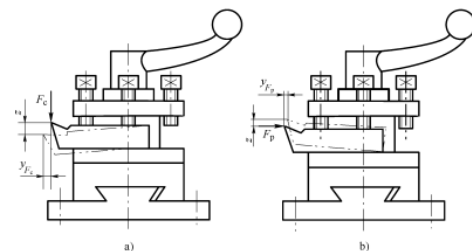


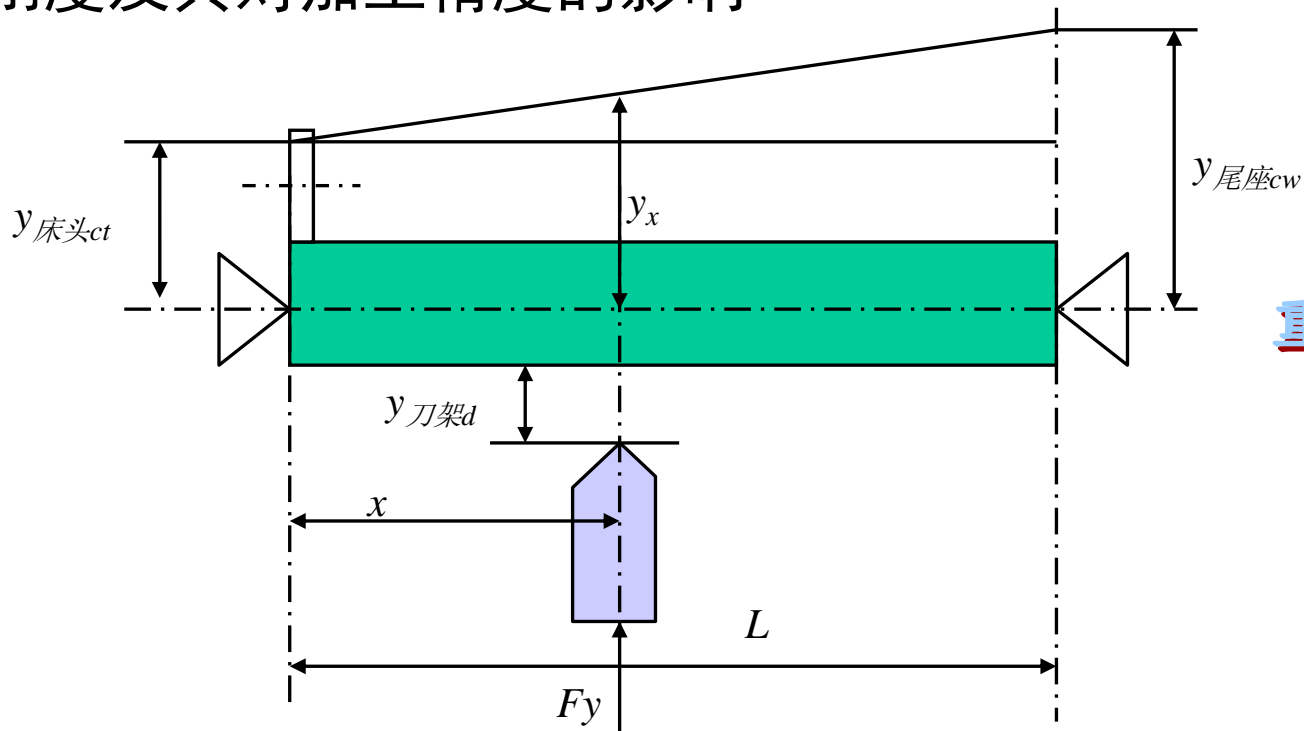
图 6-14 车刀受 F_z 力时同时在 y, z 方向产生变形

将出现 $y < 0$ 的“负刚度”情况，此时车刀刀尖将扎入工件。



2、典型工艺系统的刚度计算

(1) 机床刚度及其对加工精度的影响



重点

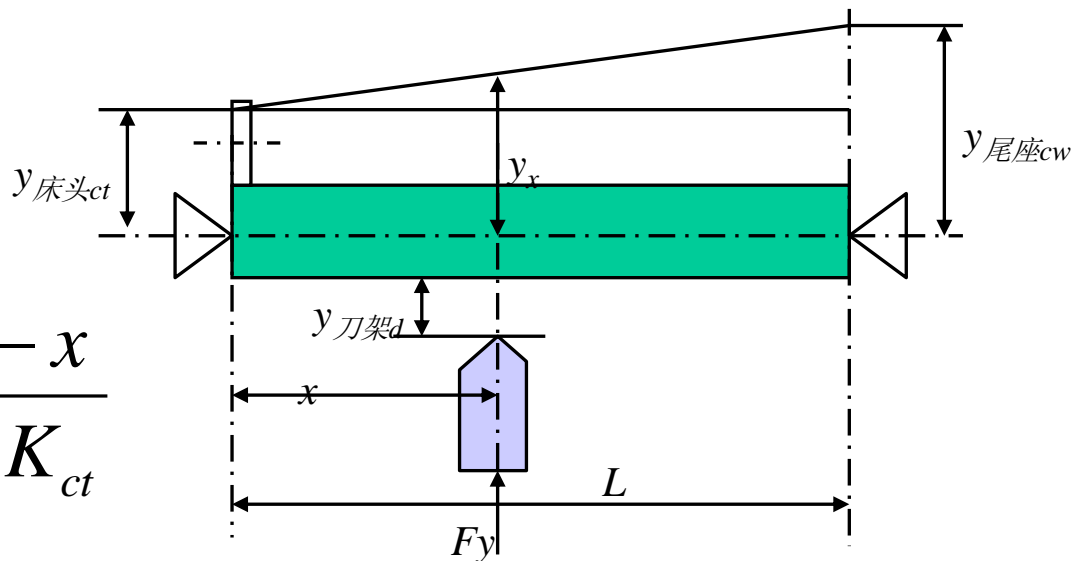
$$\begin{aligned} y_{jc} &= y_d + y_x \\ &= y_d + y_{ct} + (y_{cw} - y_{ct}) \cdot x / L \end{aligned}$$

因为：

$$y_d = F_y / K_d$$

$$y_{ct} = \frac{F_{ct}}{K_{ct}} = F_y \frac{L-x}{L \cdot K_{ct}}$$

$$y_{cw} = \frac{F_{cw}}{K_{cw}} = F_y \frac{x}{L \cdot K_{cw}}$$



代入

$$y_{jc} = y_d + y_{ct} + (y_{cw} - y_{ct}) \cdot x / L$$

得：

$$\begin{aligned} y_{jc} &= F_y \left[\frac{1}{K_d} + \frac{L-x}{L \cdot K_{ct}} + \frac{x}{L} \left(\frac{x}{L \cdot K_{cw}} - \frac{L-x}{L \cdot K_{ct}} \right) \right] \\ &= F_y \left[\frac{1}{K_d} + \frac{(L-x)^2}{L^2 \cdot K_{ct}} + \left(\frac{x}{L} \right)^2 \frac{1}{K_{cw}} \right] \quad (\text{抛物线}) \end{aligned}$$

机床刚度：

$$K_{jc} = F_y / y_{jc} = \frac{1}{\frac{1}{K_d} + \frac{(L-x)^2}{L^2 \cdot K_{ct}} + \left(\frac{x}{L} \right)^2 \frac{1}{K_{cw}}}$$

分析上式可知，工艺系统变形 $y_{\text{系}}$ 随刀架位置 x 变化而变化，在以上车削条件下，即使让切削力 F_y 保持恒定不变，在车刀自右向左进行车削过程中工艺系统变形 $y_{\text{系}}$ 也是处处不同的，这会使工件产生加工误差。

车削外圆时工艺系统受力变形图分析

$$y_{\text{系}} = y_{\text{刀架}} + y_x \approx F_p \left[\frac{1}{k_{\text{刀架}}} + \frac{1}{k_{\text{主轴}}} \left(\frac{l-x}{l} \right)^2 + \frac{1}{k_{\text{尾座}}} \left(\frac{x}{l} \right)^2 \right] \quad k_{\text{主轴}} \text{ 即 } k_{\text{床头}}$$

工艺系统最大变形和最小变形为

$$y_{\text{系min}} = \frac{F_p}{k_{\text{刀架}}} + \frac{F_p}{k_{\text{主轴}} + k_{\text{尾座}}} \quad y_{\text{系max}} = \frac{F_p}{k_{\text{刀架}}} + \frac{F_p}{k_{\text{尾座}}}$$

由于工艺系统刚度随刀架位置变化产生的误差为

$$\Delta_y = y_{\text{系max}} - y_{\text{系min}} = \frac{F_p}{k_{\text{尾座}}} - \frac{F_p}{k_{\text{主轴}} + k_{\text{尾座}}}$$

根据刚度的定义式可改写为：

$$\text{当 } x=0, \text{ (刀具在主轴箱处)} \quad y_{\text{系}(0)} = F_p \left(\frac{1}{k_{\text{刀架}}} + \frac{1}{k_{\text{主轴}}} \right)$$

$$\text{当 } x=l, \text{ (刀具在尾座处)} \quad y_{\text{系}(l)} = F_p \left(\frac{1}{k_{\text{刀架}}} + \frac{1}{k_{\text{尾座}}} \right)$$

$$\text{当 } x=l/2, \text{ (刀具中间处)} \quad y_{\text{系}(l/2)} = F_p \left(\frac{1}{k_{\text{刀架}}} + \frac{1}{4k_{\text{主轴}}} + \frac{1}{4k_{\text{尾座}}} \right)$$

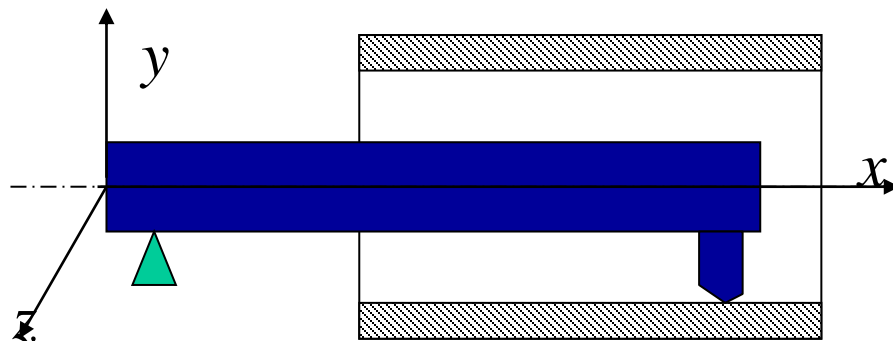
最小变形点发生在当 $x=l/(1+\alpha)$, $\alpha=k_{\text{主轴}}/k_{\text{尾座}}$

$$y_{\text{系}(x)} = F_p \left\{ \frac{1}{k_{\text{刀架}}} + \frac{1}{k_{\text{主轴}}} \left(\frac{l-x}{l} \right)^2 + \frac{1}{k_{\text{尾座}}} \left(\frac{x}{l} \right)^2 \right\}$$

(2) 刀具刚度及其对加工精度的影响

例：卧式镗床镗孔情况

$$y_{tg} = \frac{F_y \cdot L^3}{3E \cdot I}$$



式中：

E ——弹性模数，对于钢件 $E=2.06 \times 10^5 \text{MPa}$ ；

I ——截面惯性矩， mm^4 ；

L ——悬伸长度， mm 。

$$K_{tg} = \frac{F_y}{y_{tg}} = \frac{3EI}{L^3}$$

(3) 工件刚度及其对加工精度的影响

$$y_{gj} = \frac{F_y L^3}{48EI} \quad K_{gj} = \frac{F_y}{y_{gj}} = \frac{48EI}{L^3}$$

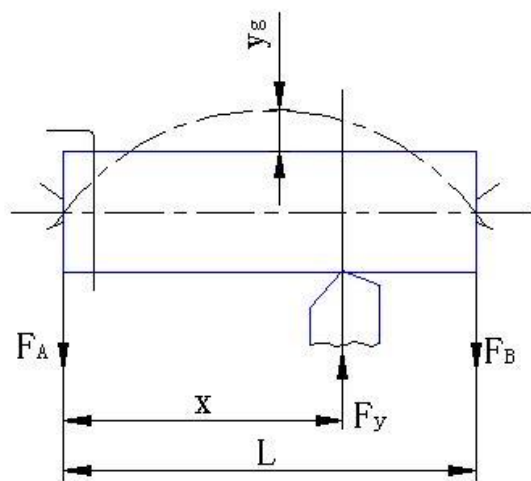


图6-17 车削细长轴时工件的变形

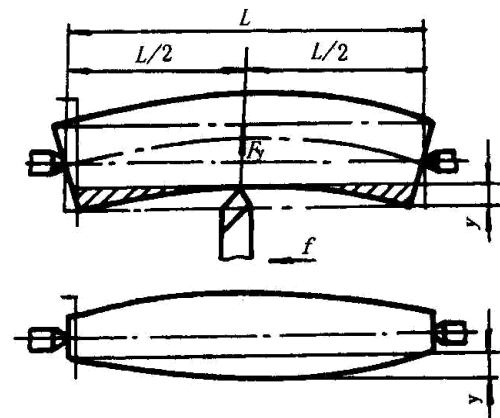


图 2-21 长轴加工时的变形和误差

$$y_g = \frac{F_p}{3EI} \cdot \frac{(L-X)^2 X^2}{L}$$

改进：使用跟刀架，合理切削用量与刀具主偏角。

工件刚度

工件安装在卡盘中加工

最大变形量按悬臂梁公式估算 $y_{\max} = \frac{F_d l^3}{3EI} (\text{mm})$

工件安装在两顶尖之间加工

最大变形量按简支梁公式估算 $y_{\max} = \frac{F_d l^3}{48EI} (\text{mm})$

工件安装在卡盘并用尾顶尖支承加工

最大变形量按静不定梁公式估算 $y_{\max} = \frac{F_d l^3}{CEI} (\text{mm})$

(4) 工艺系统的刚度计算

工艺系统在某一位置受力作用产生的变形量 $y_{\text{系}}$ 应为工艺系统各组成环节在此位置受该力作用产生的变形量的代数和，即

$$y_{\text{系}} = y_{\text{机床}} + \boxed{y_{\text{刀具}} + y_{\text{夹具}}} + y_{\text{工件}}$$

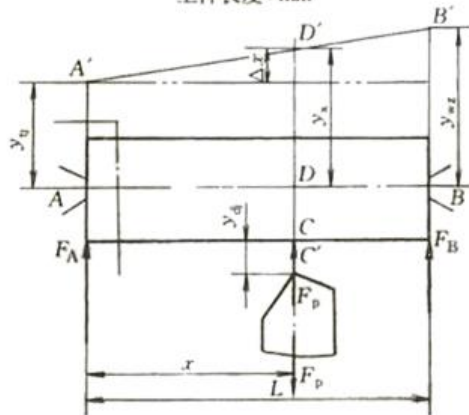
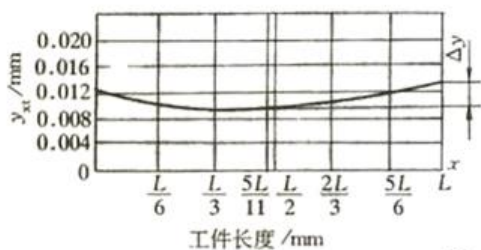
根据刚度定义得到

$$\frac{1}{k_{\text{系}}} = \frac{1}{k_{\text{机床}}} + \boxed{\frac{1}{k_{\text{刀具}}} + \frac{1}{k_{\text{夹具}}}} + \frac{1}{k_{\text{工件}}}$$

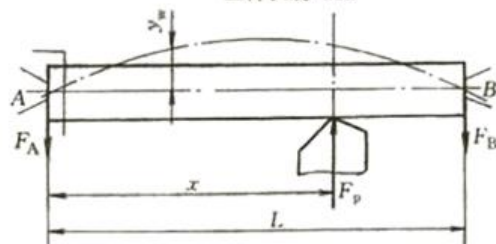
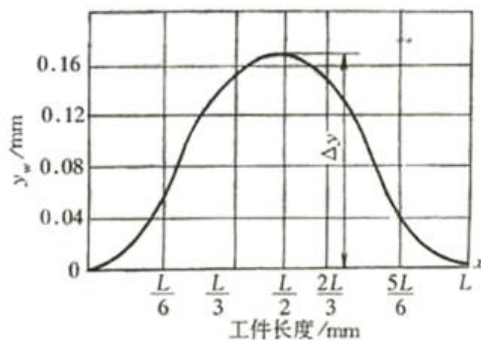
因此，求系统的位移时只考虑机床和工件的位移，这时工艺系统的总位移量和刚度分别为：

$$y_{xt} = F_y \left[\frac{1}{K_d} + \frac{(L-x)^2}{L^2 \cdot K_{ct}} + \left(\frac{x}{L} \right)^2 \frac{1}{K_{cw}} + \frac{1}{K_{gj}} \right] \quad K_{xt} = \frac{1}{\frac{1}{K_d} + \frac{(L-x)^2}{L^2 \cdot K_{ct}} + \left(\frac{x}{L} \right)^2 \frac{1}{K_{cw}} + \frac{1}{K_{gj}}}$$

$$y_{xt} = F_y \left[\frac{1}{K_d} + \frac{(L-x)^2}{L^2 \cdot K_{ct}} + \left(\frac{x}{L} \right)^2 \frac{1}{K_{cw}} + \frac{1}{K_{gj}} \right] \quad K_{xt} = \frac{1}{\frac{1}{K_d} + \frac{(L-x)^2}{L^2 \cdot K_{ct}} + \left(\frac{x}{L} \right)^2 \frac{1}{K_{cw}} + \frac{1}{K_{gj}}}$$



a)



b)

切削力作用点位置的变化对工艺系统变形的影响

a) 车短粗轴 b) 车细长轴

归纳

1) 机床刚度及其对加工精度的影响:

以车床加工光轴为例，刀尖运动轨迹是抛物线。

2) 刀具刚度及其对加工精度的影响:

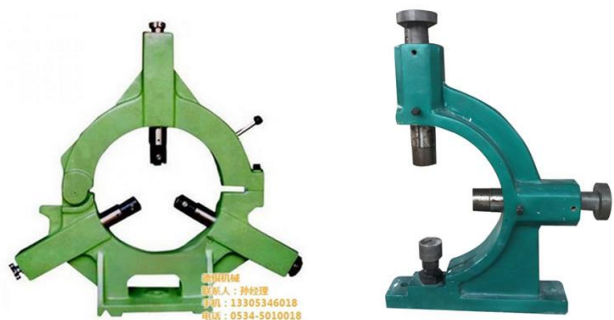
一般不显著，但在某些情况下不可忽略。以卧式镗床镗孔为例。

3) 工件刚度及其对加工精度的影响:

以车床加工长轴为例，工件成鼓形。

改进：使用跟刀架，合理切削用量与刀具主偏角。

*跟刀架的作用



练习题

【例题】 已知车床的主轴箱刚度为300000 N/mm,尾座刚度为56600 N/mm,刀架刚度为30000 N/mm,径向分力为4000 N。设工件刚度、刀具刚度、夹具刚度相对较大,试计算加工一长度为 l 的光轴,由于工艺系统刚度引起的圆柱度误差是多少?

解: 有公式可求得

$$y_{\text{系max}} = F_p \left[\frac{1}{k_{\text{刀架}}} + \frac{1}{k_{\text{尾座}}} \right] = 4000 \times \left(\frac{1}{300000} + \frac{1}{56600} \right) = 0.204\text{mm}$$

$$y_{\text{系min}} = F_p \left[\frac{1}{k_{\text{刀架}}} + \frac{1}{k_{\text{主轴}} + k_{\text{尾座}}} \right] = 4000 \times \left(\frac{1}{300000} + \frac{1}{300000 + 56600} \right) = 0.144\text{mm}$$

由于工艺系统刚度变化引起的工件圆柱度误差:

$$\Delta = y_{\text{系max}} - y_{\text{系min}} = 0.204 - 0.144 = 0.06\text{mm}$$

3、误差复映规律

在加工过程中，由于工件的加工余量发生变化、工件材质不均匀等因素引起切削力变化，使工艺系统发生变形，从而产生加工误差。

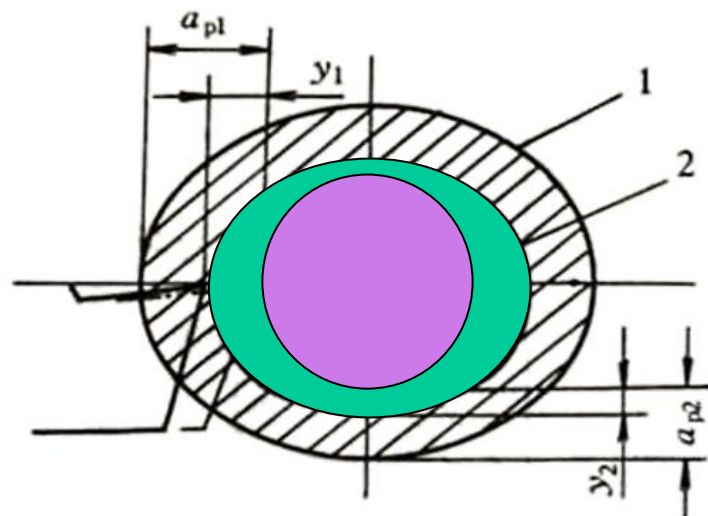
加工后工件表面上保留着与毛坯表面类似的但数值已大大缩小的尺寸或形状误差，这种现象称为“误差复映”。

$$y_1 = \frac{F_{y1}}{K_{xt}} \quad F_{y1} = 0.4C_{fz} a_{p1} f^{0.75}$$

$$d y_1 = \frac{0.4C_{fz} f^{0.75} d a}{K_{xt}}$$

误差复映系数 ε :

$$\frac{d y_1}{d a} = \frac{0.4C_{fz} f^{0.75}}{K_{xt}}$$



毛坯形状误差的复映

1—毛坯表面 2—工件表面

一次走刀不能达到工件精度要求时，可以采用多次走刀来消除毛坯误差所复映的误差。

4、机床变形的原因和提高机床刚度的措施

引起机床变形的主要因素

- 1、接触刚度的影响。
- 2、机床零件中个别薄弱环节的影响。
- 3、零件的夹紧力的影响。
- 4、摩擦力的影响。
- 5、间隙的影响。

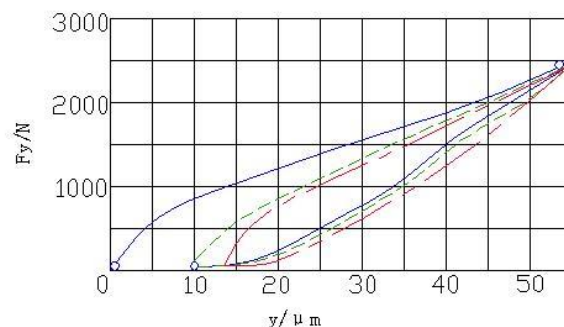
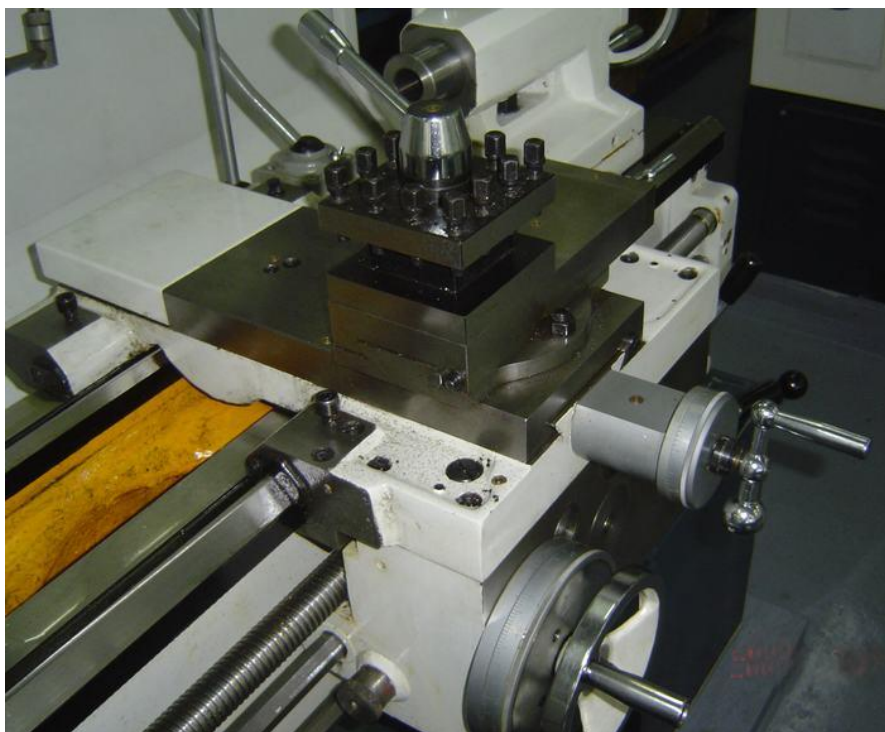


图6-13 车床刀架的静刚度特性曲线

—— 一次加载 - - - 二次加载 - · - 三次加载

- 1、单向静载测力法
- 2、三向静刚度测定法
- 3、工作状态测定法

1、接触刚度的影响。



车床溜板箱

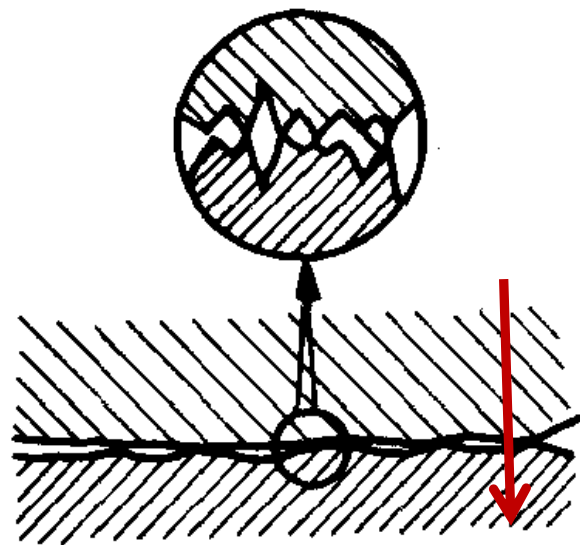


图 6-18 接触面表面质量对
接触刚度的影响

减小连接零件表面的粗糙度可提高机床构件、部件间接触刚度

2、机床零件中个别薄弱环节的影响。

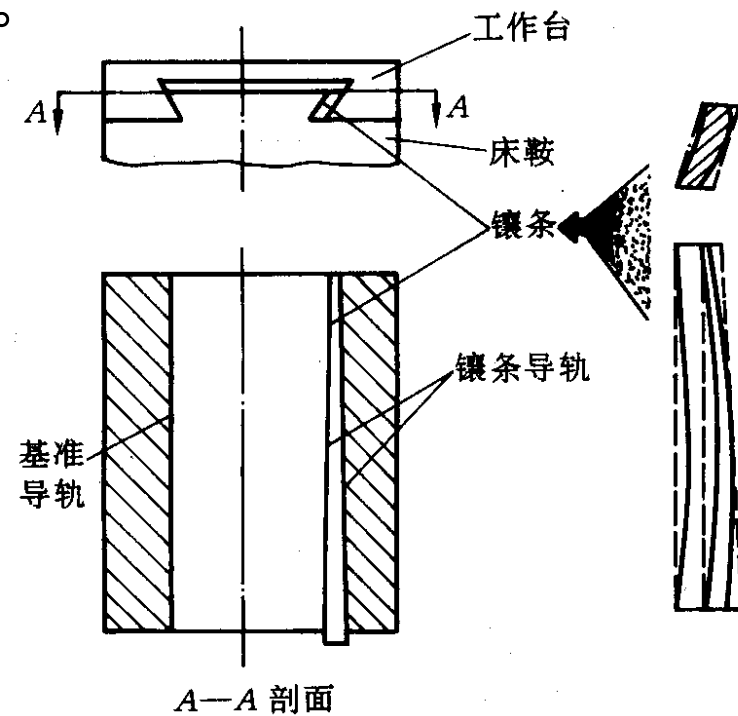
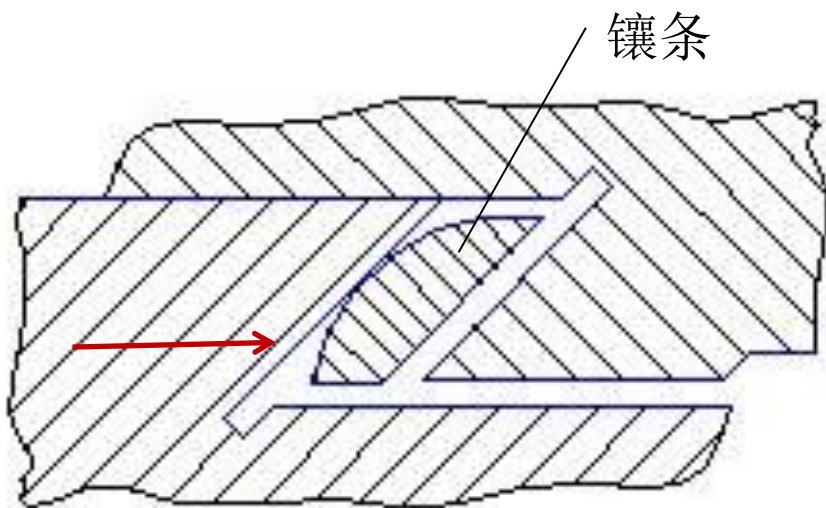
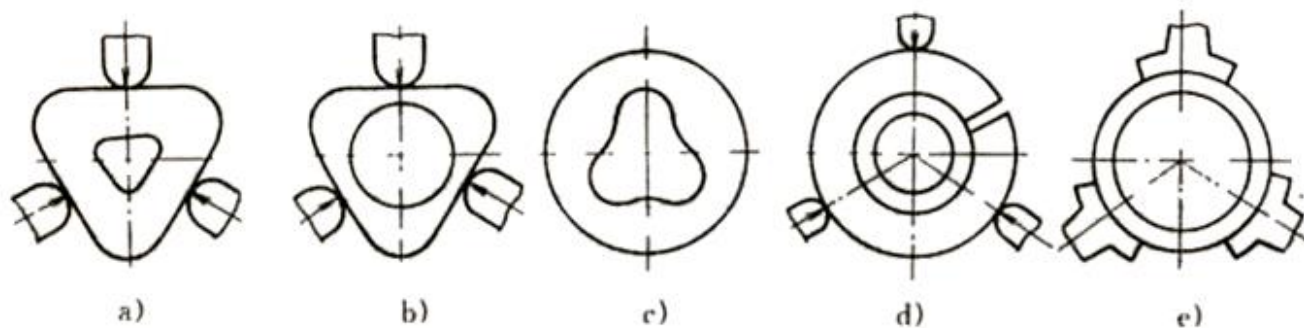


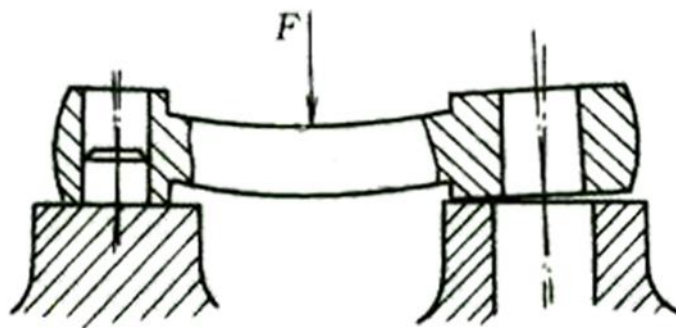
图 6-19 刚度较差的零件——镶条

3、零件的夹紧力的影响。



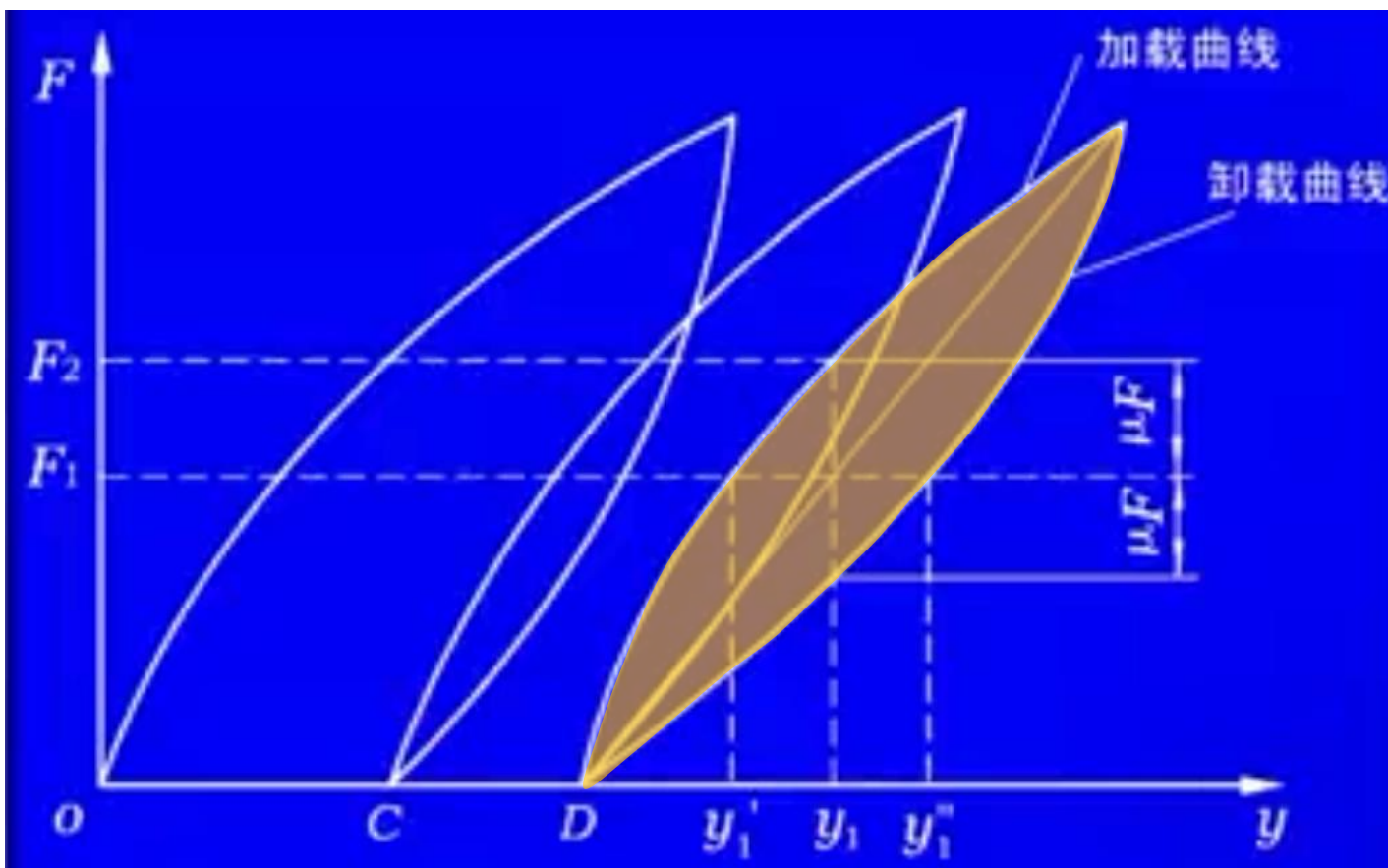
工件夹紧变形引起的加工误差

- a) 用普通三爪直接夹紧套筒变形 b) 将孔镗圆 c) 松开套筒后，孔变形
d) 采用开口夹具夹紧套筒，环变形 e) 采用弧形三爪夹紧，可避免变形



夹紧力作用点不当引起的加工误差

4、摩擦力的影响。



摩擦力对机床部件刚度的影响

5、间隙的影响。

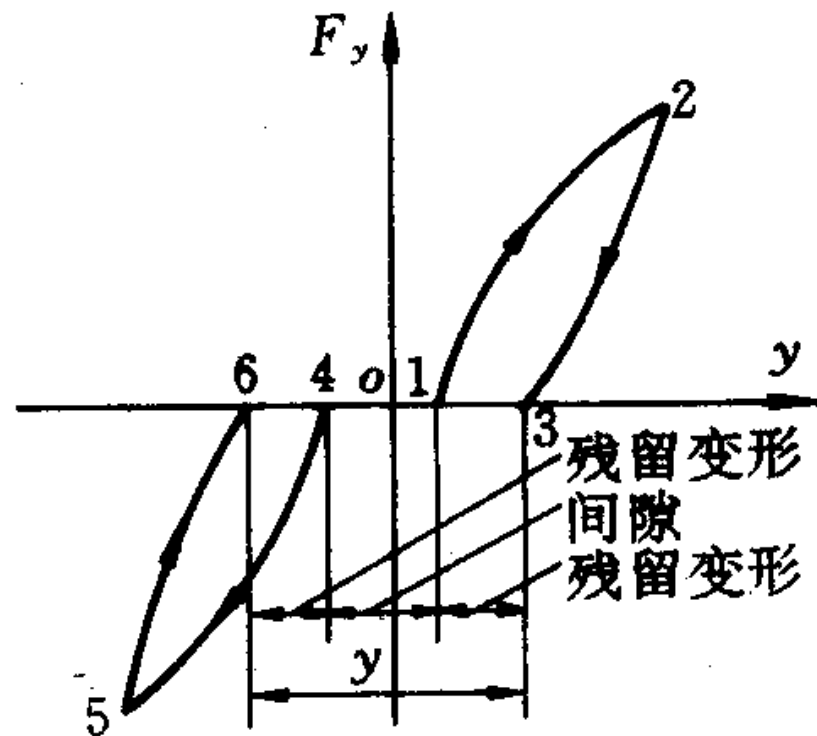


图 6-16 正反加卸载变形曲线

减少工艺系统受力变形的措施

（一）、提高工艺系统刚度

- （1）提高接触刚度
- （2）提高工件刚度，减少受力变形
- （3）提高机床部件刚度，减少受力变形
- （4）合理装夹工件，减少夹紧变形

（二）合理安排工艺路线

（三）减小载荷及其变化

*为什么要提高接触刚度?

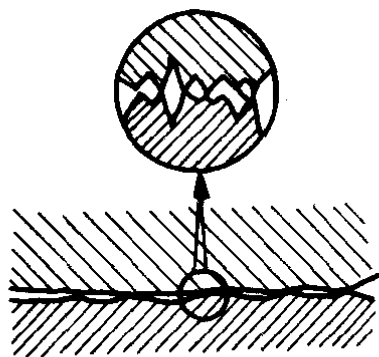


图 6-18 接触面表面质量对接触刚度的影响

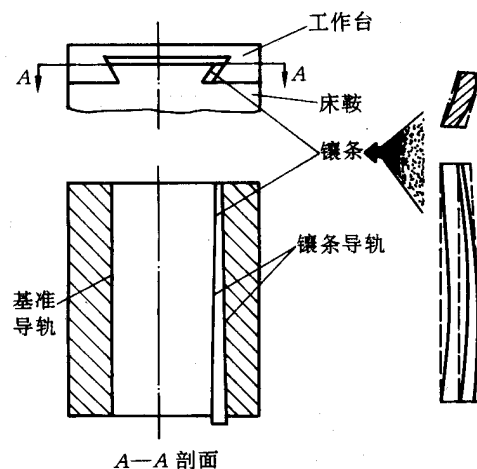


图 6-19 刚度较差的零件——镶条

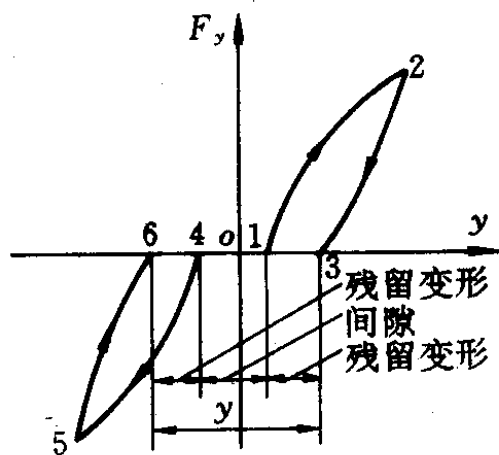


图 6-16 正反加卸载变形曲线

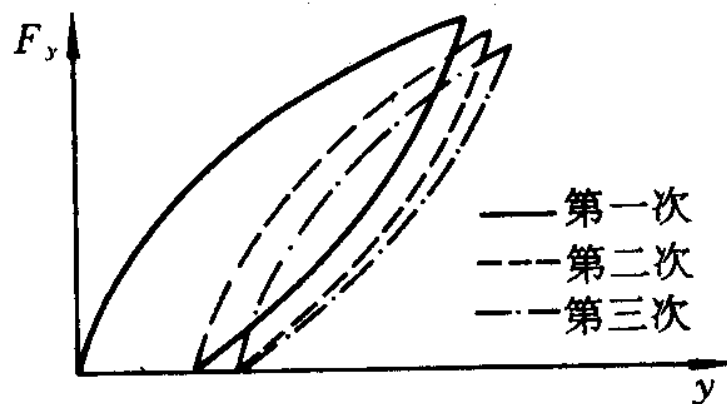
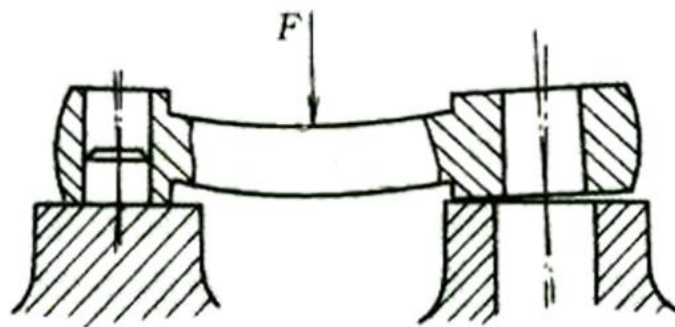


图 6-17 多次重复加卸载变形曲线

*为什么要提高工件刚度?



夹紧力作用点不当引起的加工误差

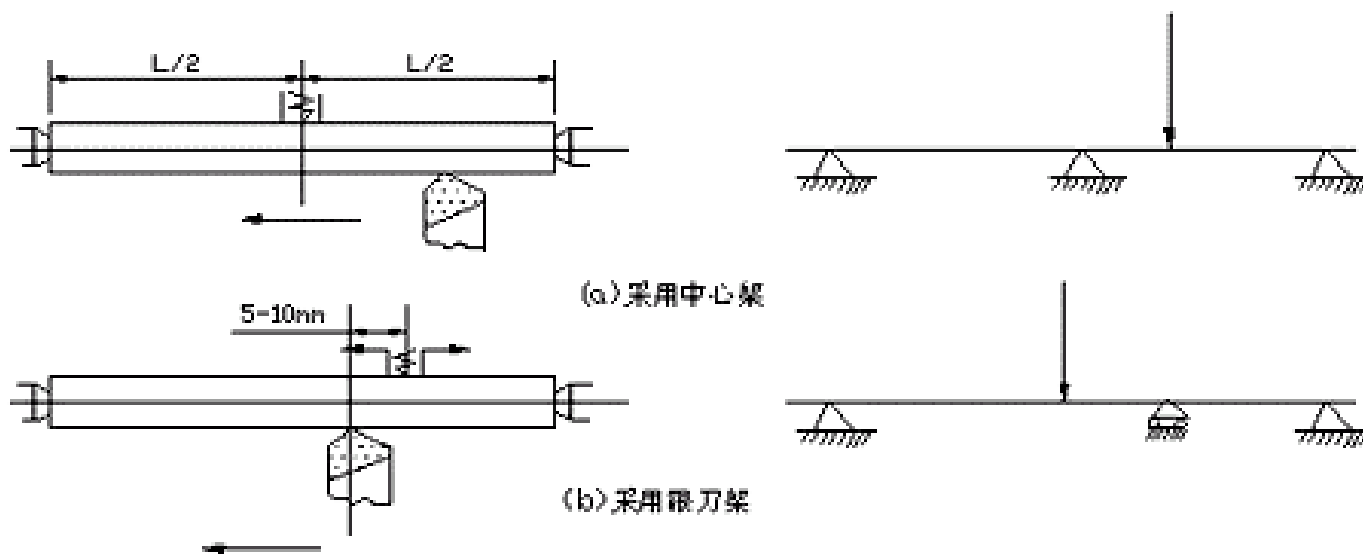


图4-19 增加支撑提高工件刚度

*如何提高机床部件刚度?

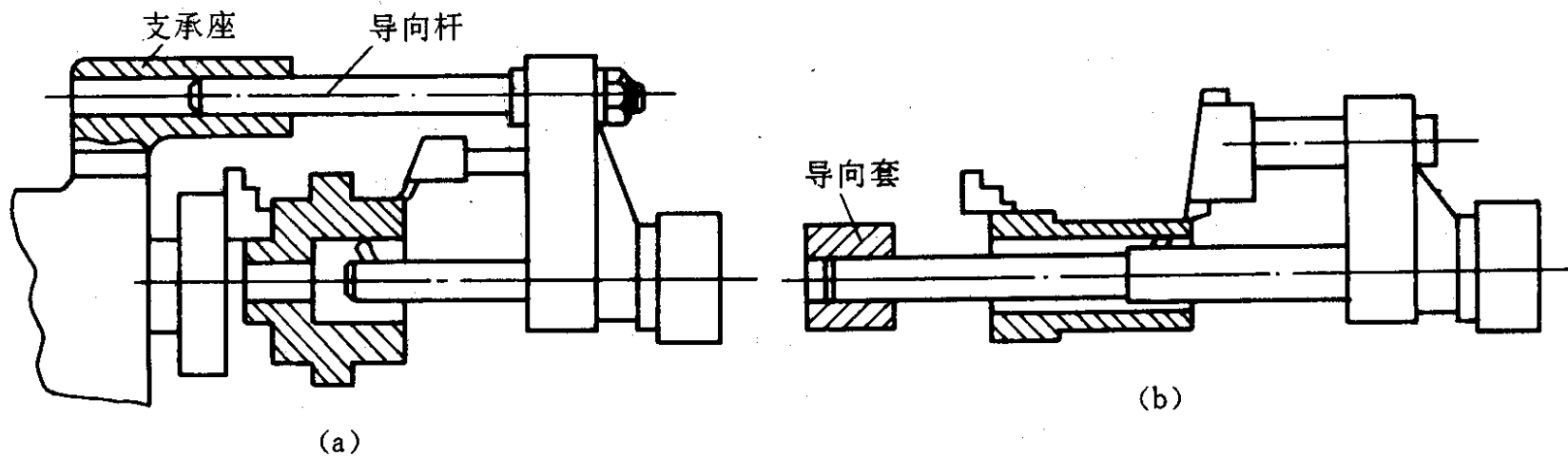
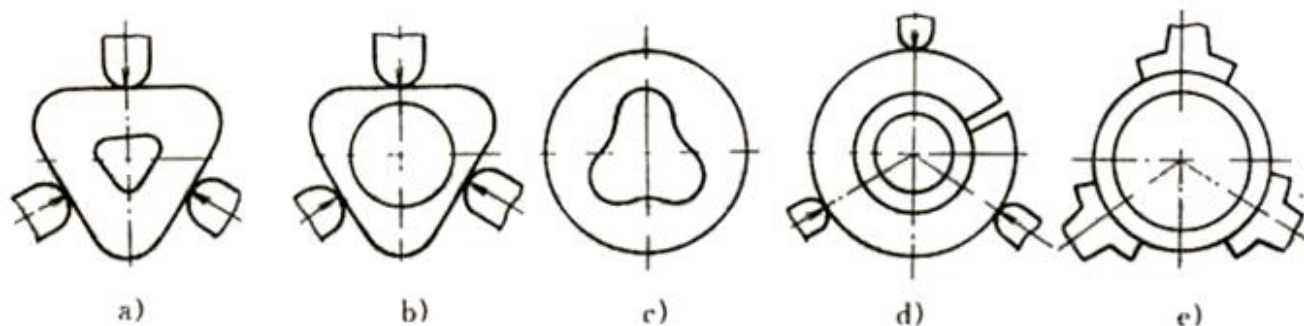


图 6-35 提高加工时刀具的刚度

*如何减少夹紧变形？



工件夹紧变形引起的加工误差

- a) 用普通三爪直接夹紧套筒变形 b) 将孔镗圆 c) 松开套筒后，孔变形
d) 采用开口夹具夹紧套筒，环变形 e) 采用弧形三爪夹紧，可避免变形

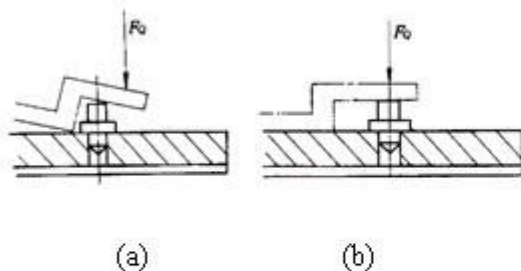


图 3-30 夹紧力作用点应在支承面内

- (a) 不合理 (b) 合理

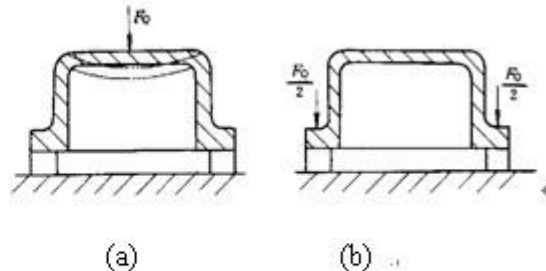
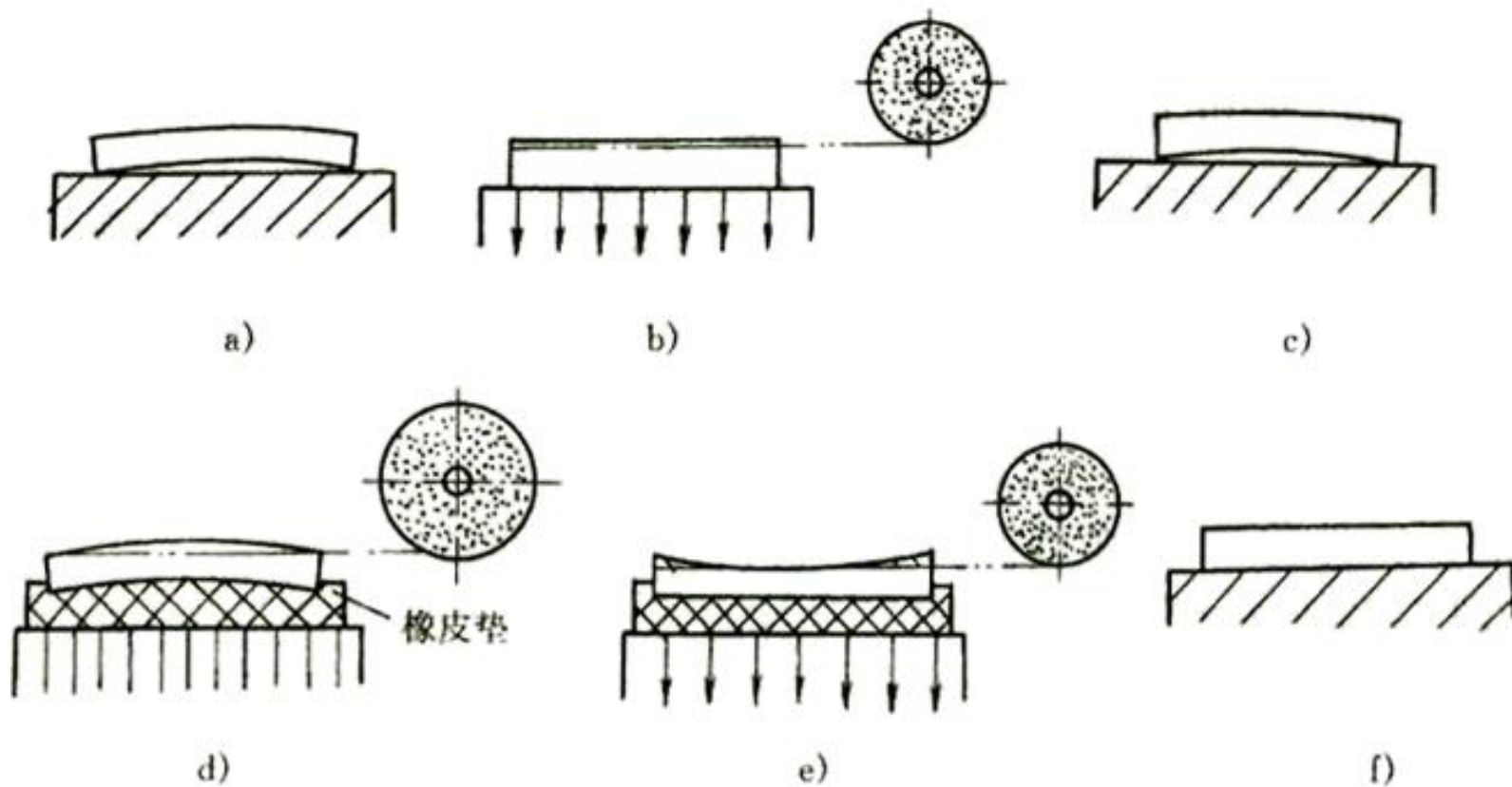


图 3-31 夹紧力作用点应在刚性较好部位

- (a) 不合理 (b) 合理

*如何合理安排工艺路线?



薄板工件磨削

a) 毛坯翘曲 b) 吸盘吸紧 c) 磨后松开 d) 磨削凸面 e) 磨削凹面 f) 磨后松开

*如何减小载荷?

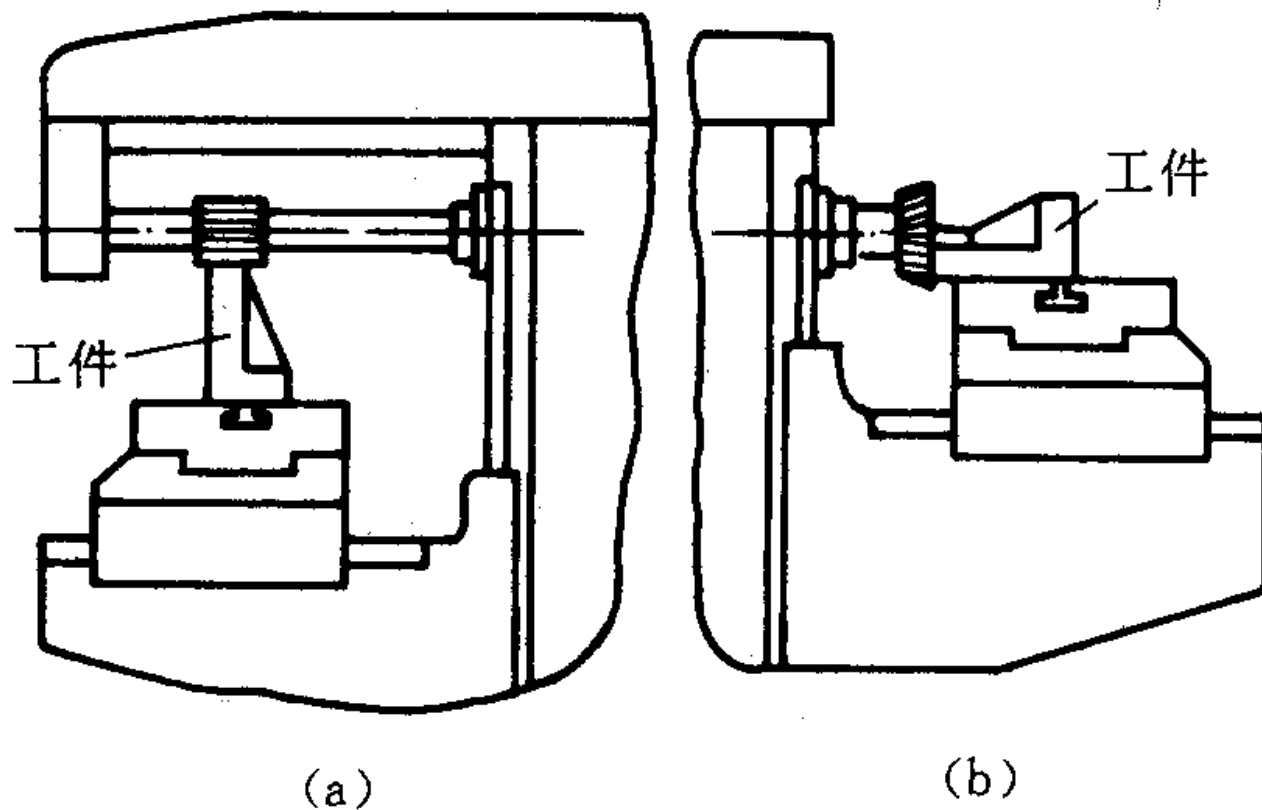
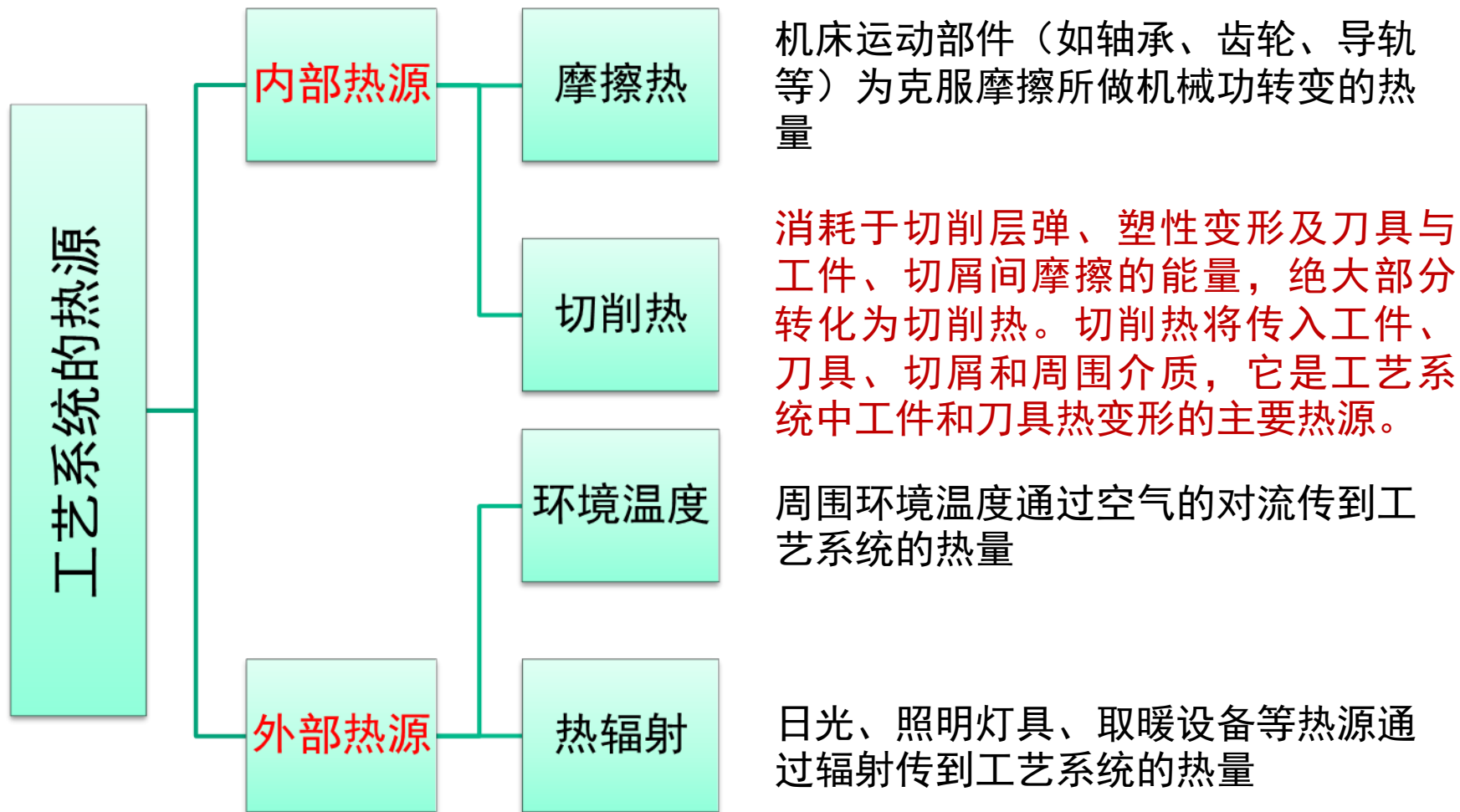


图 6-34 提高工件安装时的刚度

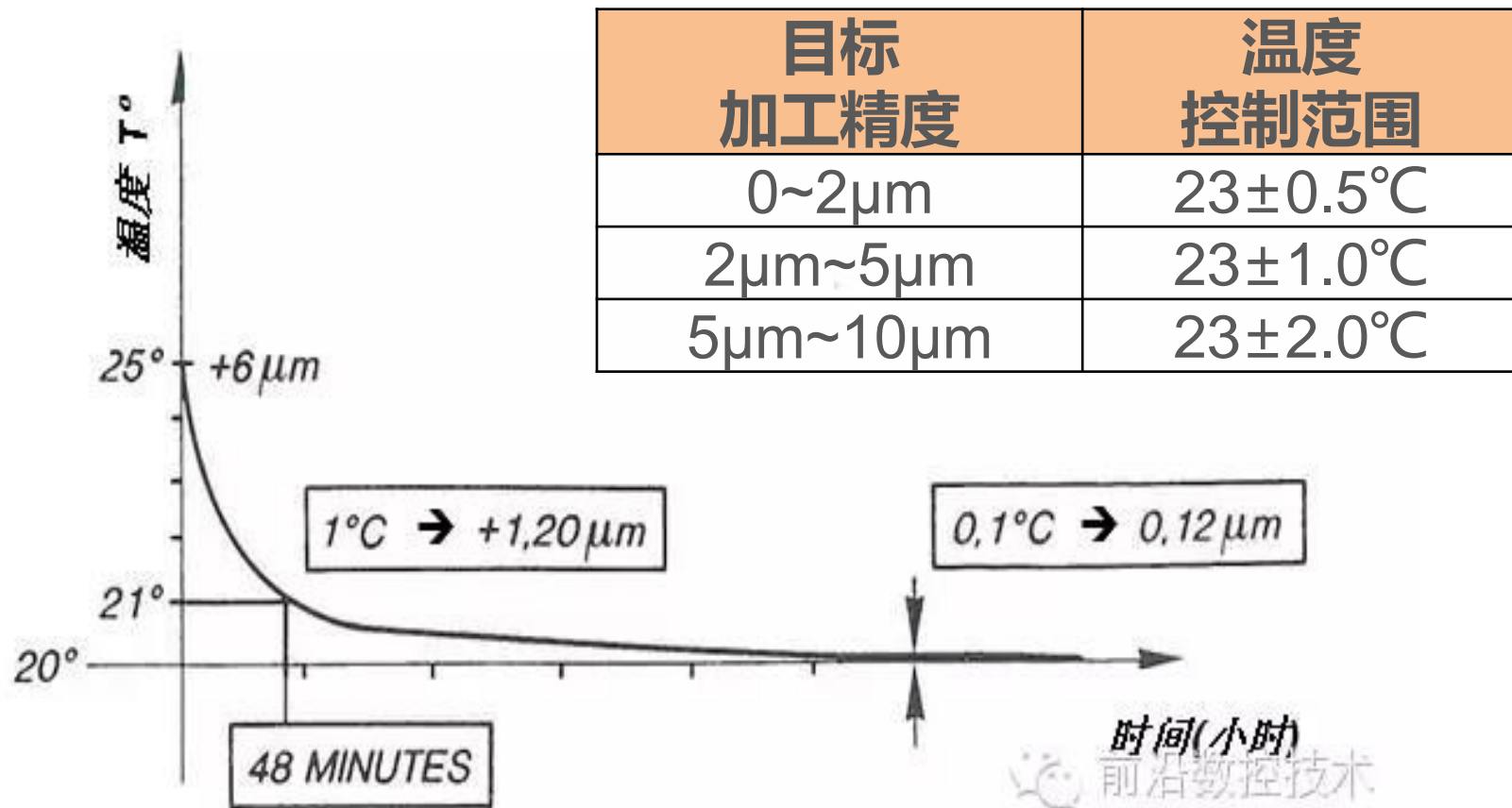
七、工艺系统热变形所引起的误差

The errors from thermal deformation of process system



*实例：温度对精度的影响

钢件：100 x 30 x 20 mm



热稳定（温度对精度的影响）

*实例：温度对精度的影响

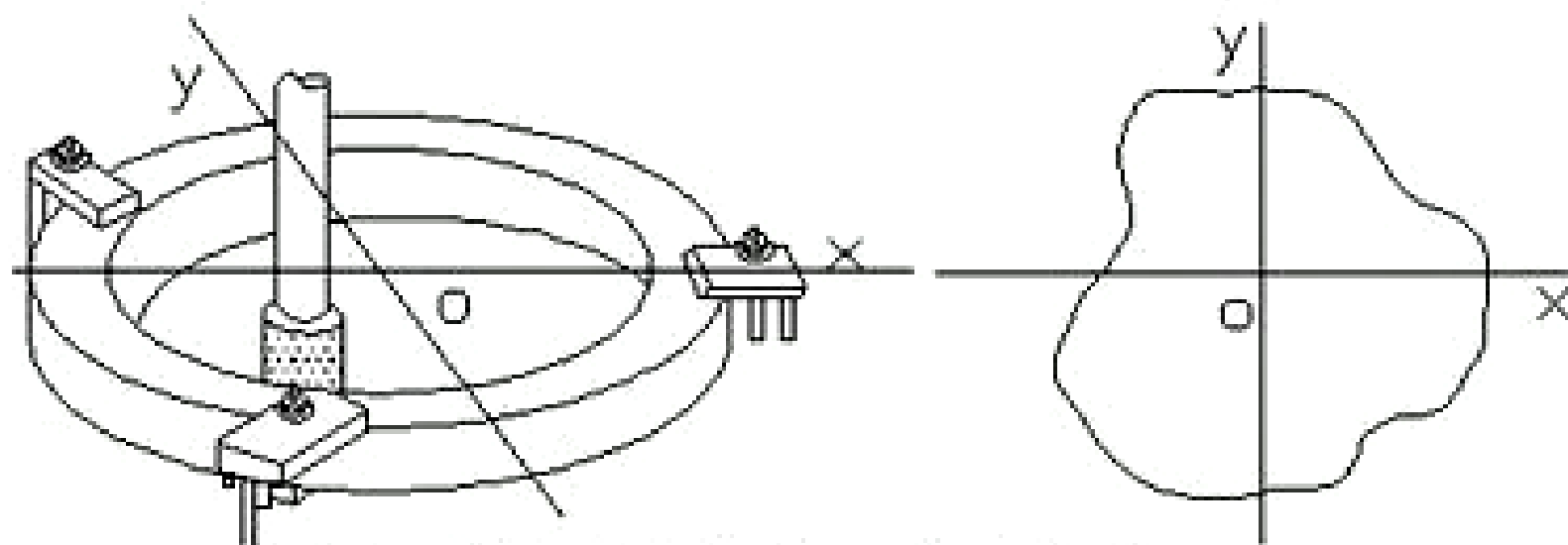


图4-27 薄圆环磨削时热变形的影响

工艺系统的热变形有：机床热变形、刀具热变形、工件热变形。

(1) 机床热变形

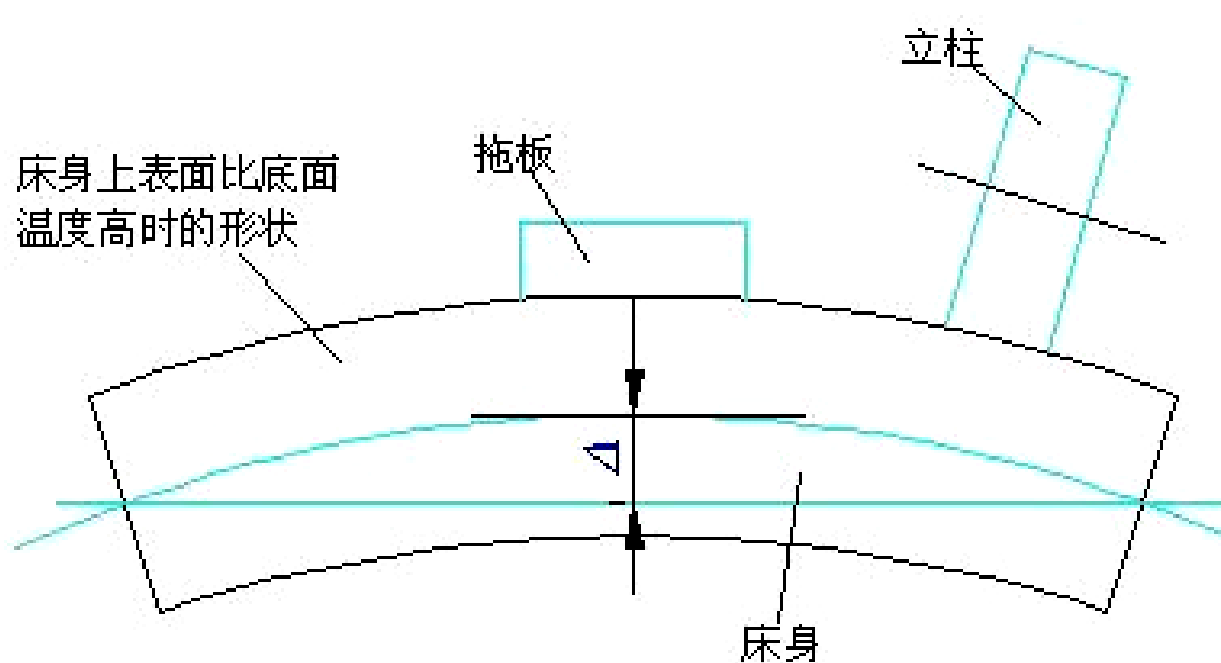
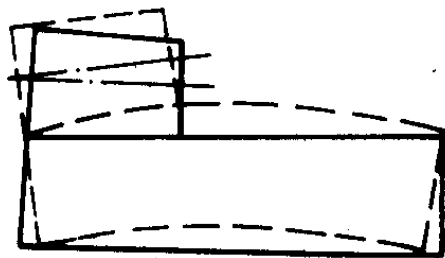


图4-25 床身纵向温度热效应的影响

a、车、铣、钻、镗，机床的主要热源

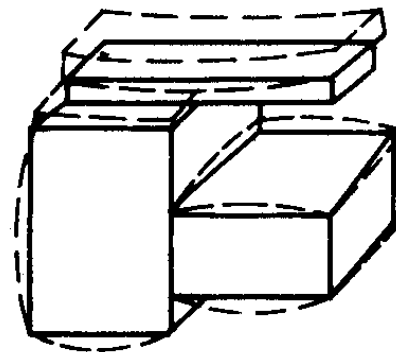
主轴箱轴承的摩擦热及主轴箱中油池的发热。
导致主轴箱及它相连部分的床身温度升高。



(a) 车床



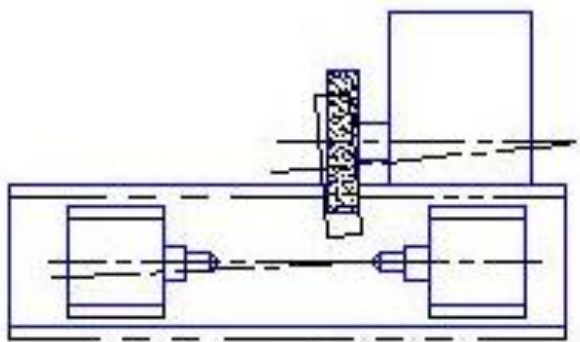
(b) 立铣床



(c) 卧铣床

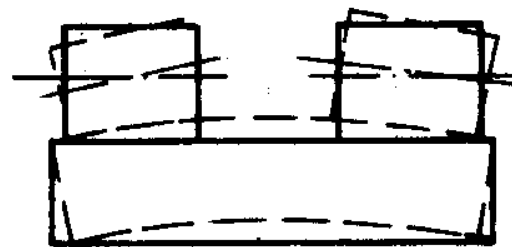
b、磨床类机床的热变形

- 1、液压系统——油池
- 2、高速磨头——砂轮架、工件头架，
- 3、冷却液（磨削热）——床身



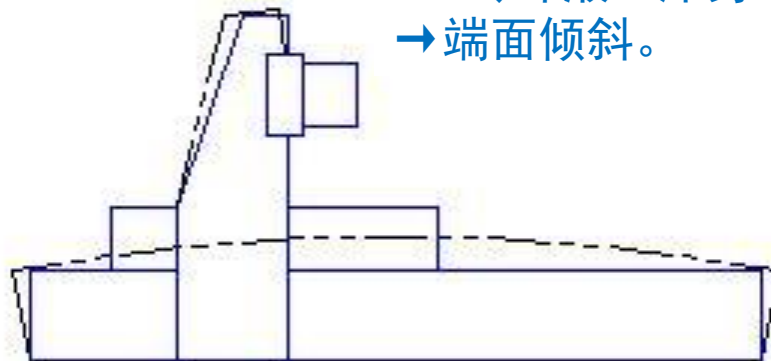
外圆磨床：

- (1) 砂轮架→倾斜→工件直径；
- (2) 工件头架→倾斜→锥度



双端面磨床：

- 1) 砂轮架，
- 2) 冷却液→床身中部→中凸
→端面倾斜。



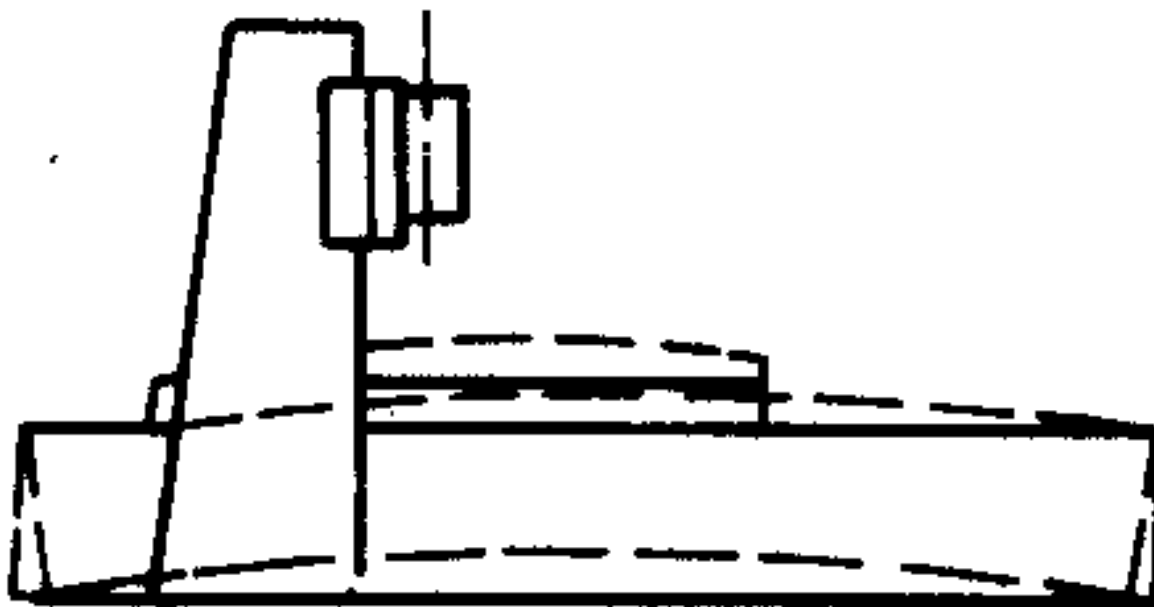
平面磨床：

- (1) 砂轮架→立柱；
- (2) 液压→油池→床身内，下高，中凹；

c、大型机床热变形

龙门铣、刨、导轨磨床→床身较长：

- 1、导轨面磨擦
- 2、环境温度，辐射。



解决措施：

- 1、精加工前空车运转；
- 2、减少停车；
- 3、控制切削用量；
- 4、减少环境温度的影响；
- 5、充分冷却。

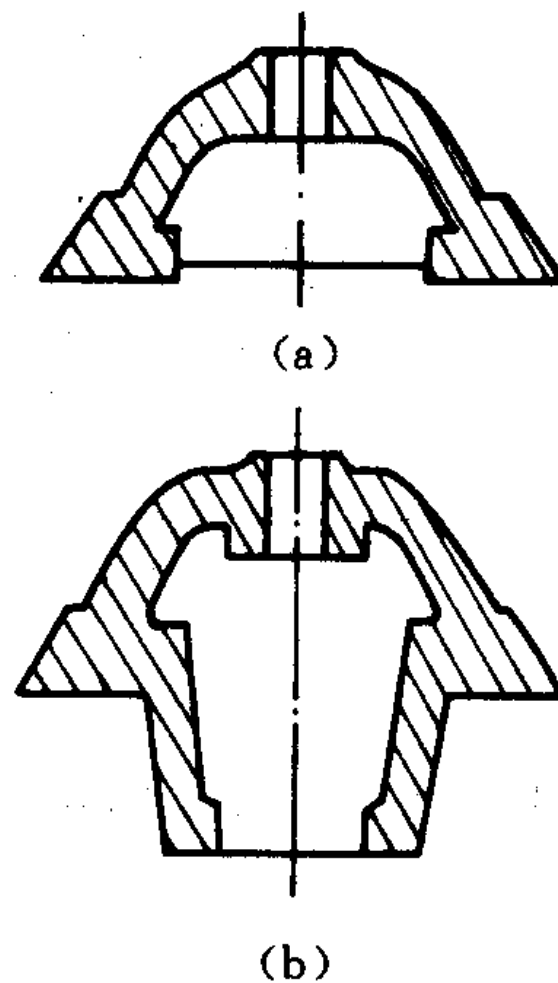


图 6-41 热对称结构

(b) 刀具热变形

刀具的热变形对加工精度的影响与磨损情况相反，但不如磨损显著。

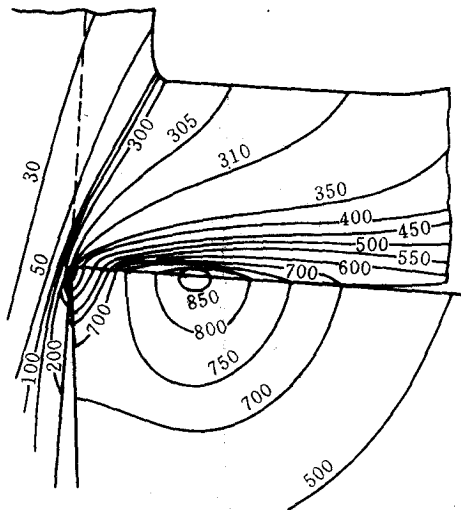


图 2-42 刀具、切屑和工件的温度分布
工件材料: GCr15; 刀具: YT4 车刀, $\gamma_o = 0^\circ$;
切削用量: $b_D = 5.8\text{mm}$, $h_D = 0.35\text{mm}$, $v_c = 80\text{m/min}$

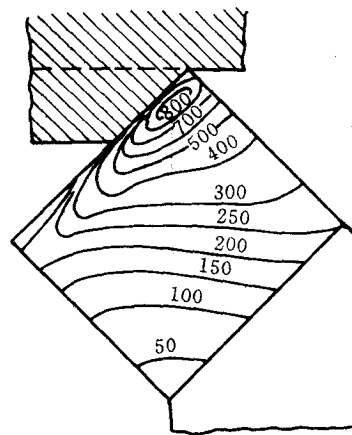


图 2-43 刀具前刀面上的切削温度分布
工件材料: GCr15; 刀具: YT4 车刀;
切削用量: $a_p = 4.1\text{mm}$, $f = 0.5\text{mm/r}$, $v_c = 80\text{m/min}$

解决措施: 改进刀具几何角度, 合理选择切削用量; 减少刀具的伸出长度; 充分冷却。

刀具热变形及其对加工精度的影响

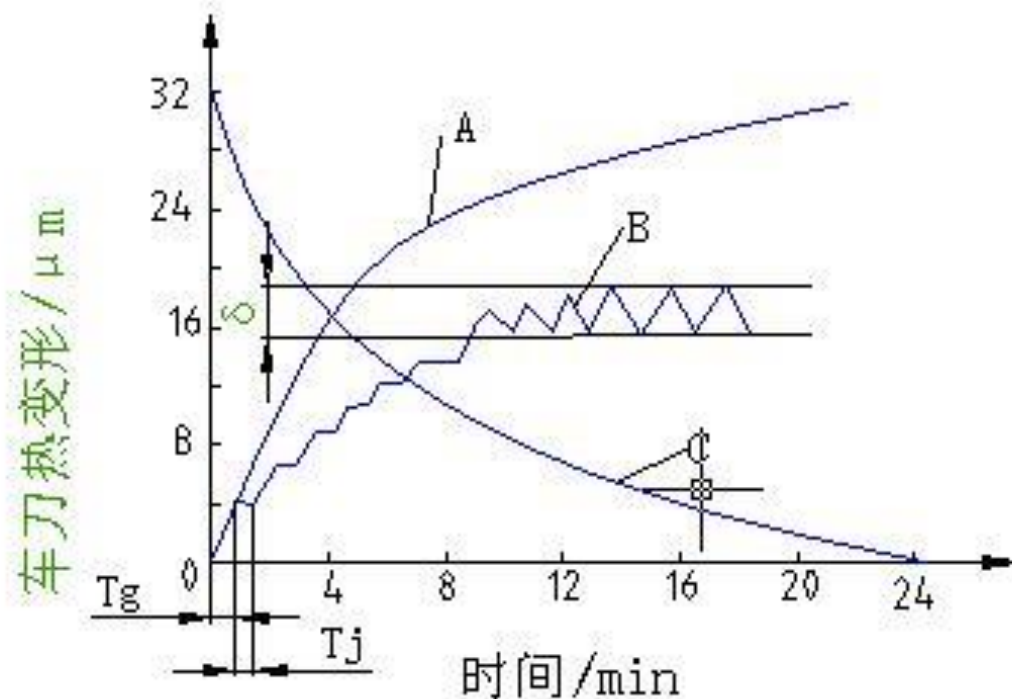


图6-26 车刀热变形

A-连续切削 B-间断切削 C-冷却

T_g -切削时间 T_j -间断时间

(c) 工件热变形

引起工件热变形的热源主要是切削热，有些大型精密件还受环境温度影响。

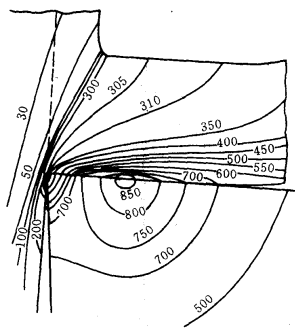


图 2-42 刀具、切屑和工件的温度分布
工件材料: GCr15; 刀具: YT4 车刀, $\gamma_0 = 0^\circ$;
切削用量: $b_D = 5.8\text{mm}$, $h_D = 0.35\text{mm}$, $v_c = 80\text{m/min}$

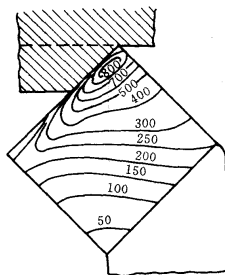
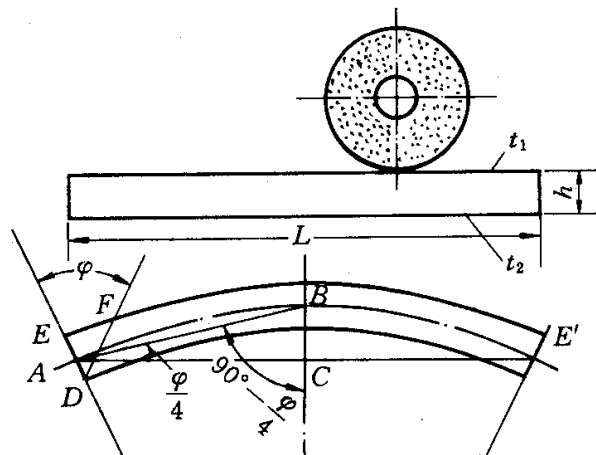


图 2-43 刀具前刀面上的切削温度分布
工件材料: GCr15; 刀具: YT4 车刀;
切削用量: $a_p = 4.1\text{mm}$, $f = 0.5\text{mm/r}$, $v_c = 80\text{m/min}$



工件热变形对加工精度的影响:

- ①工件均匀受热
- ②工件不均匀受热
- ③工件热变形受阻
- ④工件结构和散热条件不同

尺寸误差
形状误差
形状误差
形状误差

工件热变形解决措施：

1. 充分冷却；
2. 提高切削速度或进给速度；
3. 粗加工后停放一段时间后再进行精加工；
4. 刀具或砂轮及时刃磨或修正；
5. 工件在夹紧状态下有伸缩自由。

减少和控制工艺系统热变形的主要途径

（一）合理的结构设计

1、热对称结构

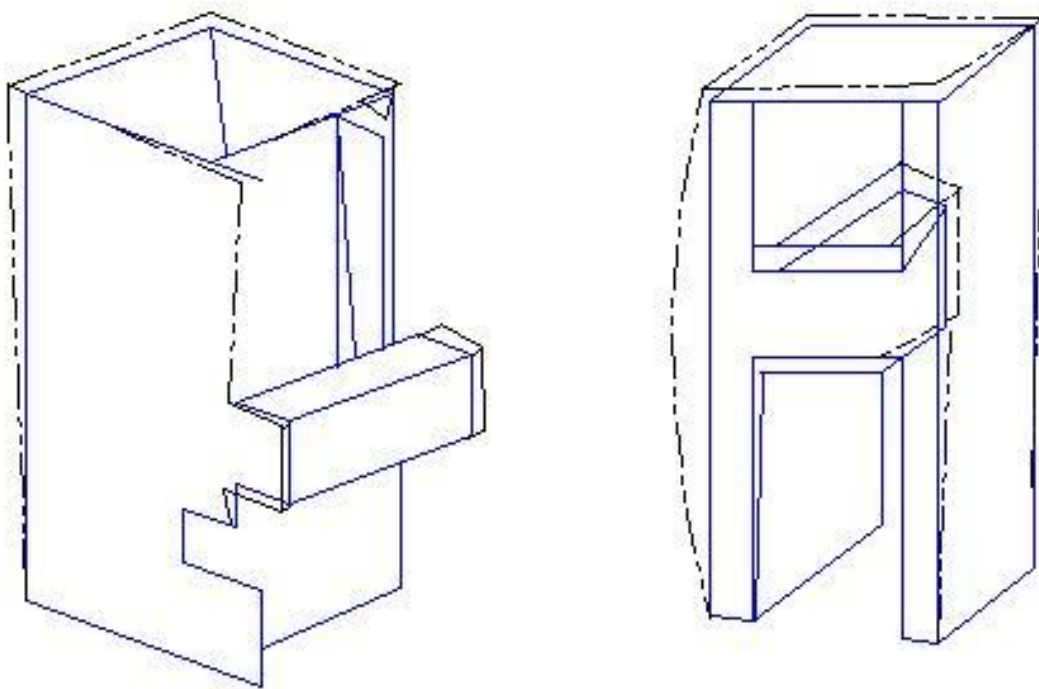


图6-27 加工中心机床立柱的热变形比较

2、合理的装配基准

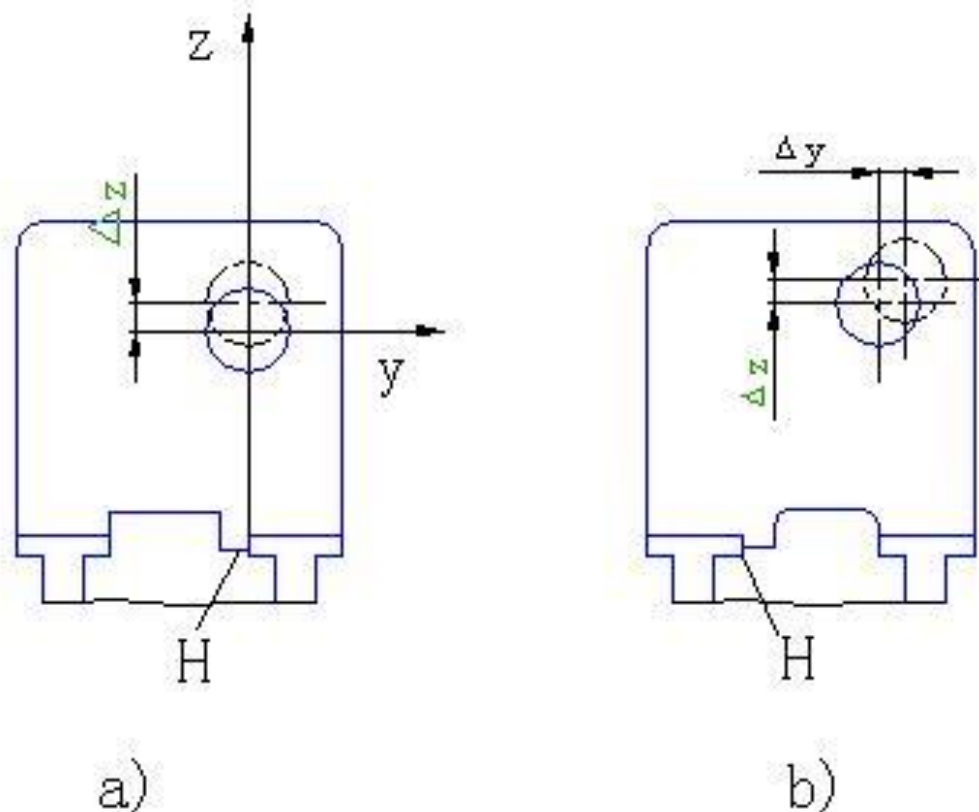


图6-28 车床主轴箱定位面位置对热变形的影响

3、均衡温度场

热空气均衡前后壁温度场

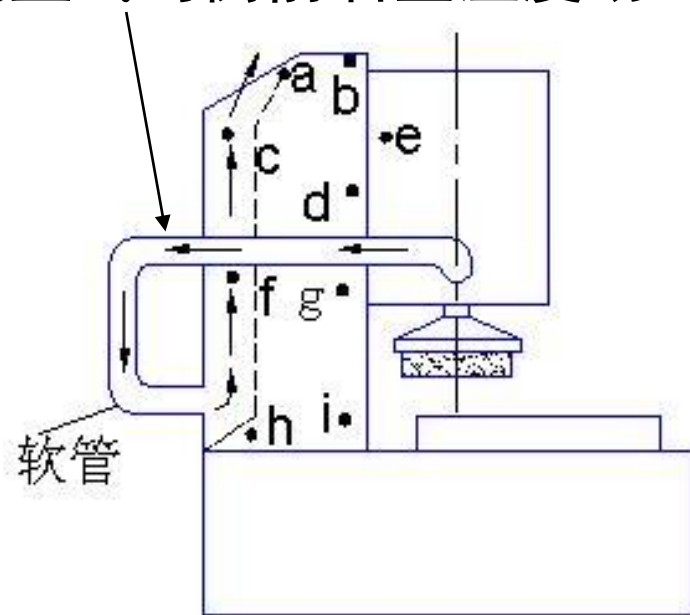


图6-29 均衡立柱前后壁的温度场

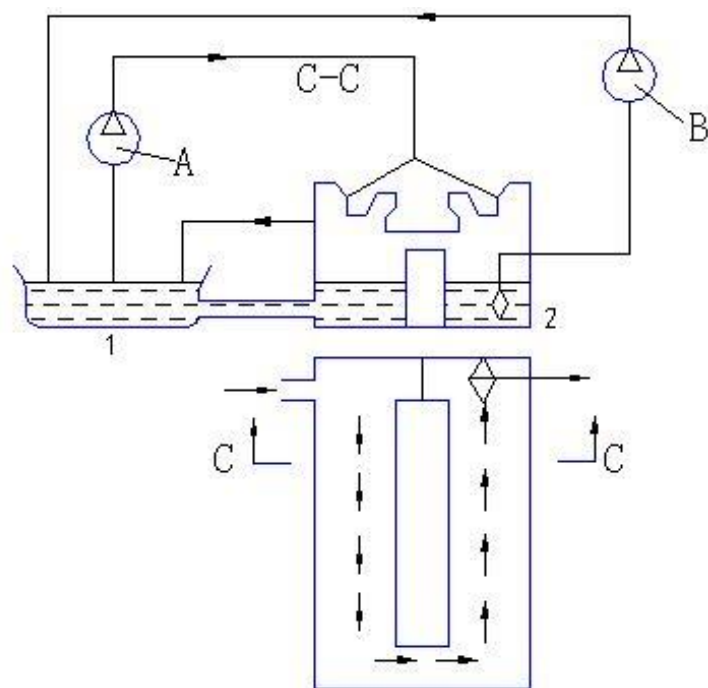


图6-30 M7150A型磨床的热补偿油沟
A、B-液压泵 1-油箱 2-热补偿油沟

(二) 隔热和冷却

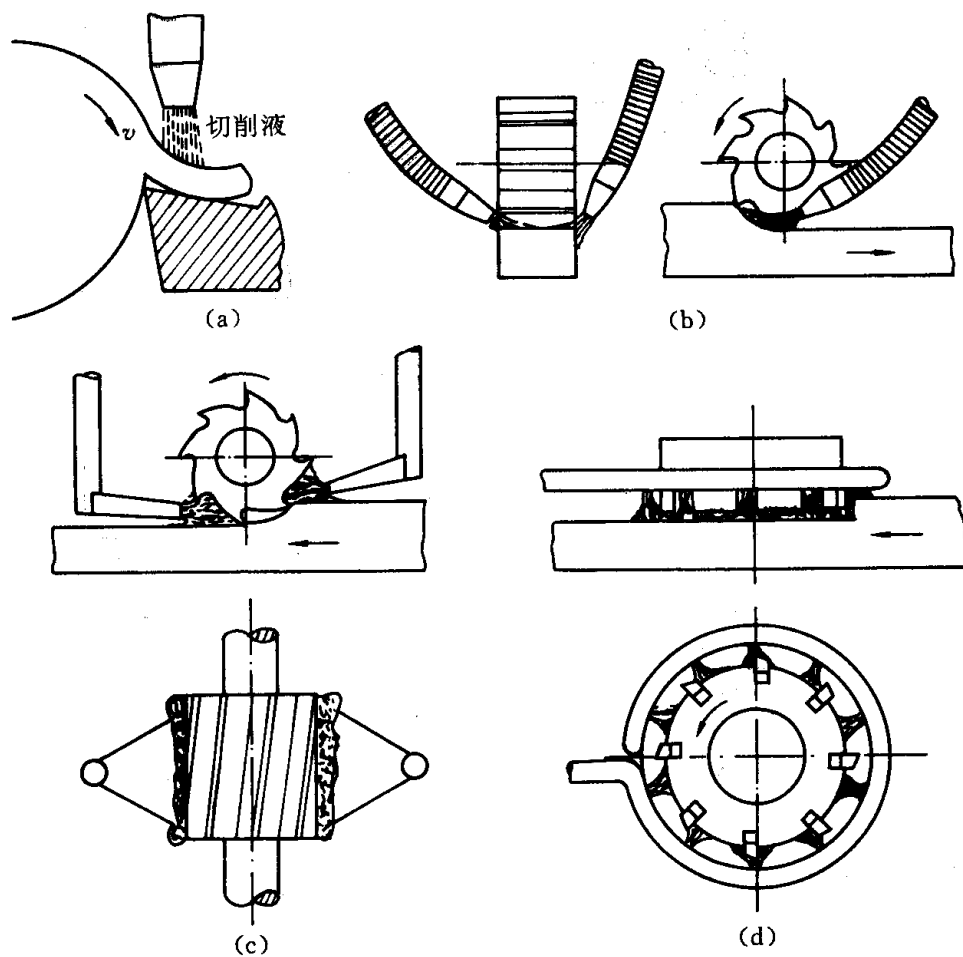


图 2-76 浇注切削液的几种方法

(三) 保持热平衡状态 空转加热，人为加热

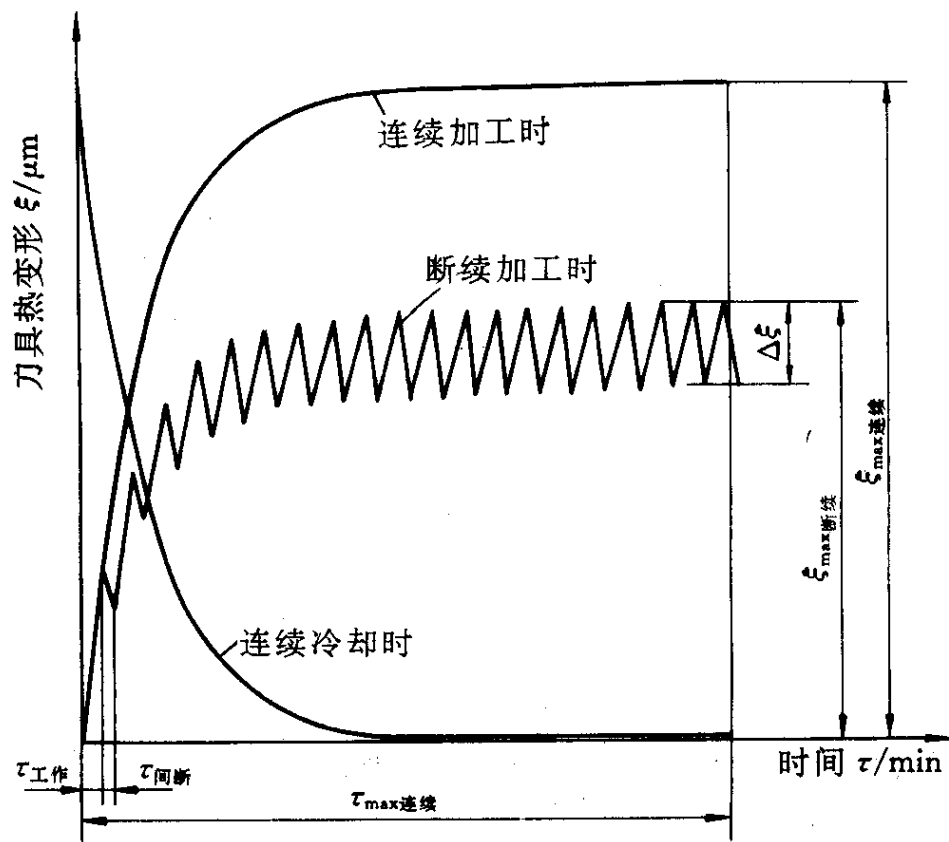
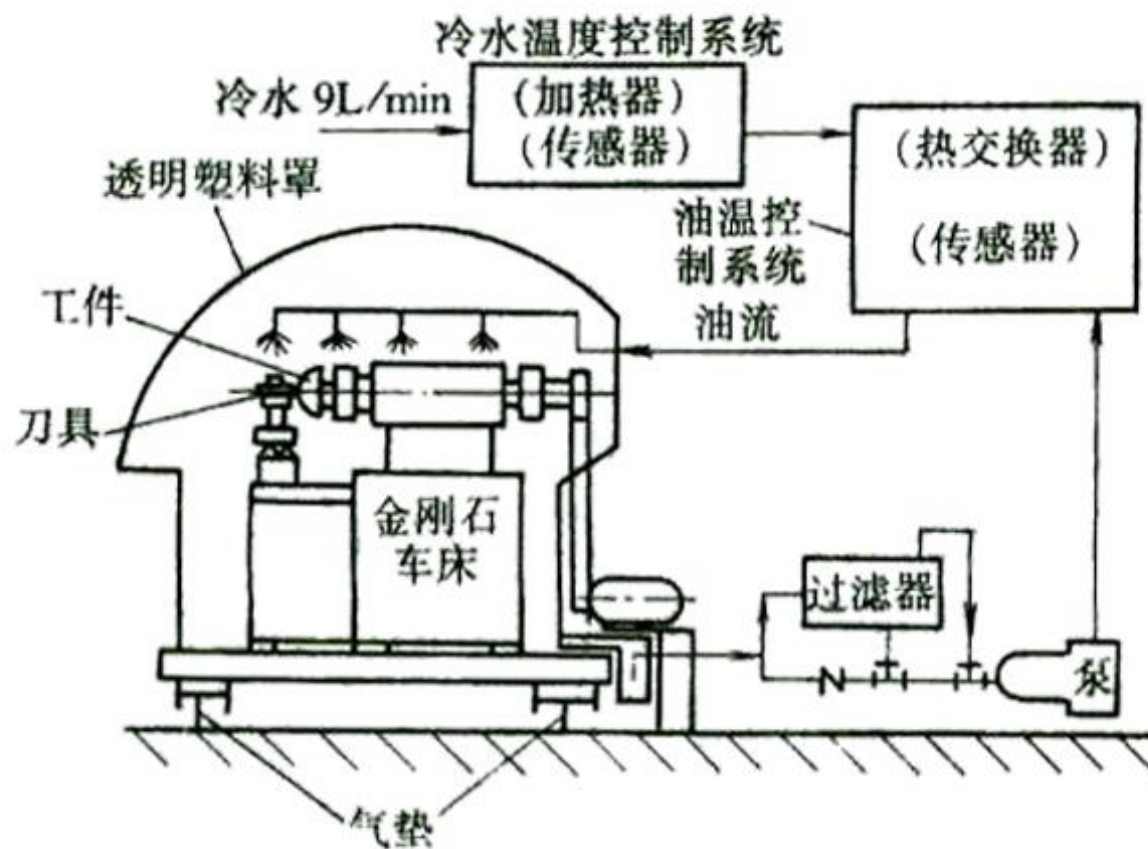


图 6-39 有节奏加工时车刀的温度变形规律

(四) 控制环境温度、恒温。



喷油冷却示意图

八、工件内应力所引起的误差

The errors from internal stress of work piece

1、内应力概念

亦称残余应力，是指在没有外力作用下或去除外力作用后残留在工件内部的应力。

当带有内应力的工件受到力或热的作用时，内应力将重新分布，并伴随有变形发生，使工件产生加工误差。

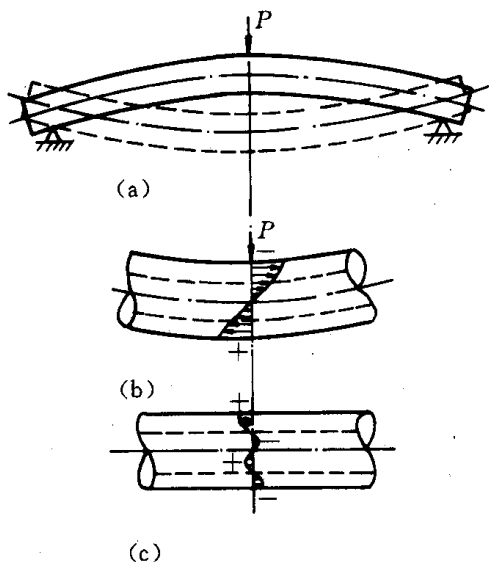


图 6-33 校直引起的内应力

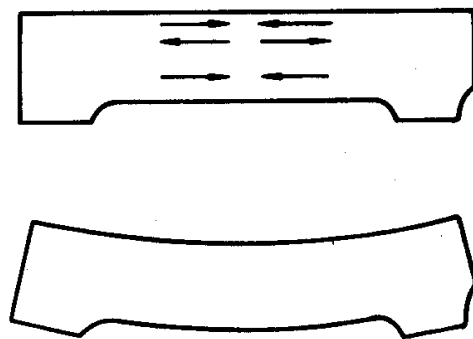
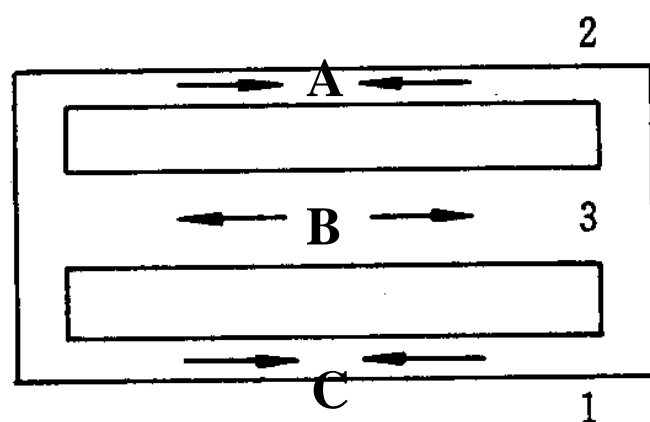


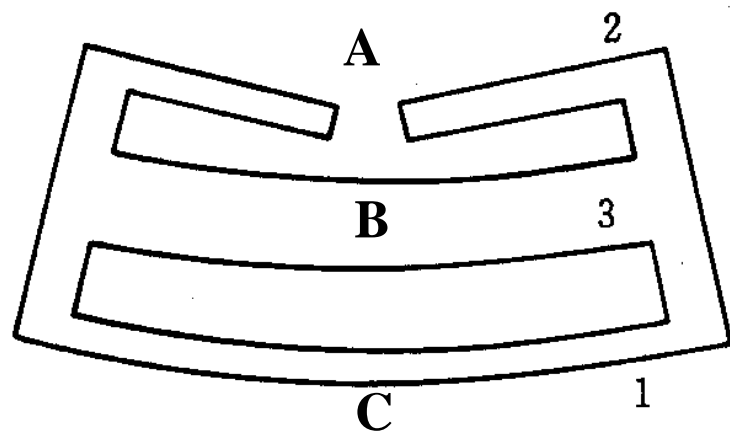
图 6-32 床身因内应力而引起的变形

2、内应力产生的原因：

(1) 毛坯制造中产生的内应力



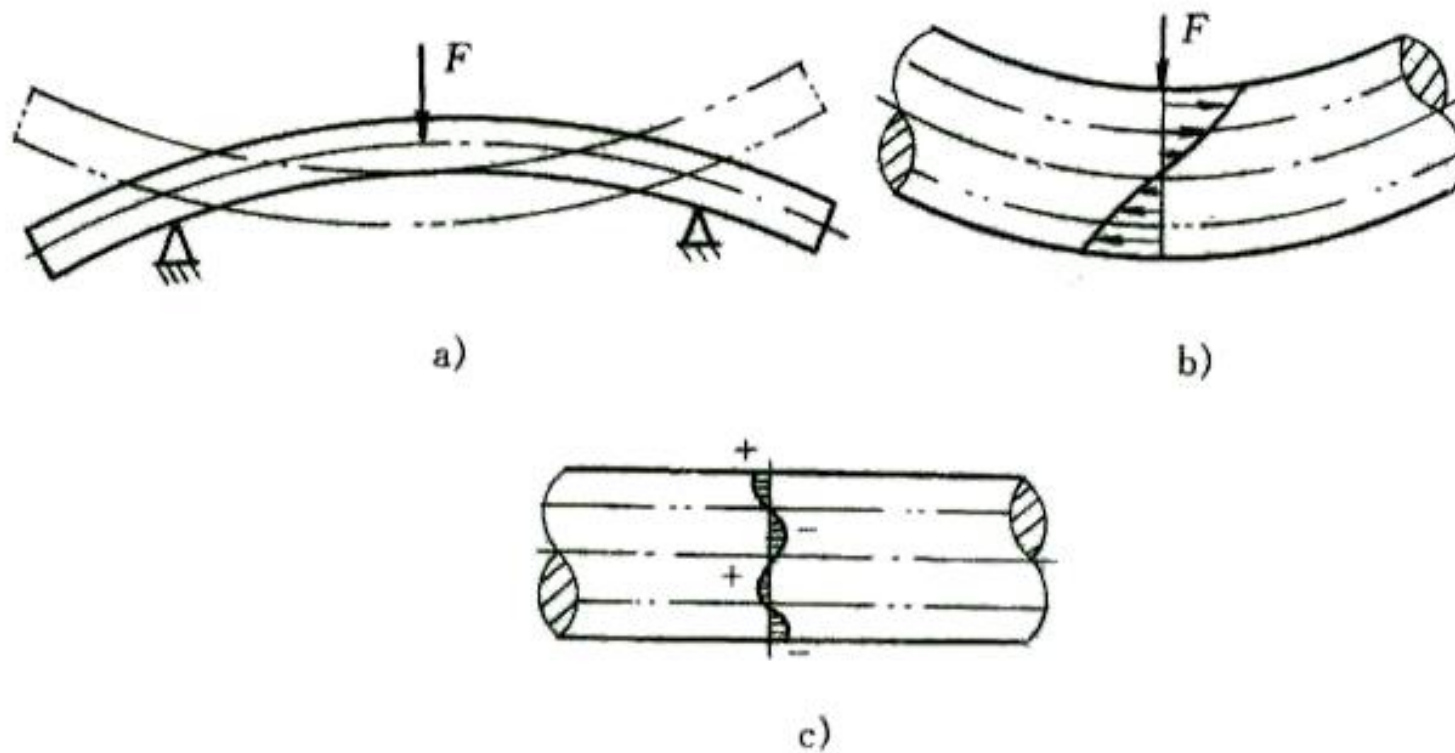
(a)



(b)

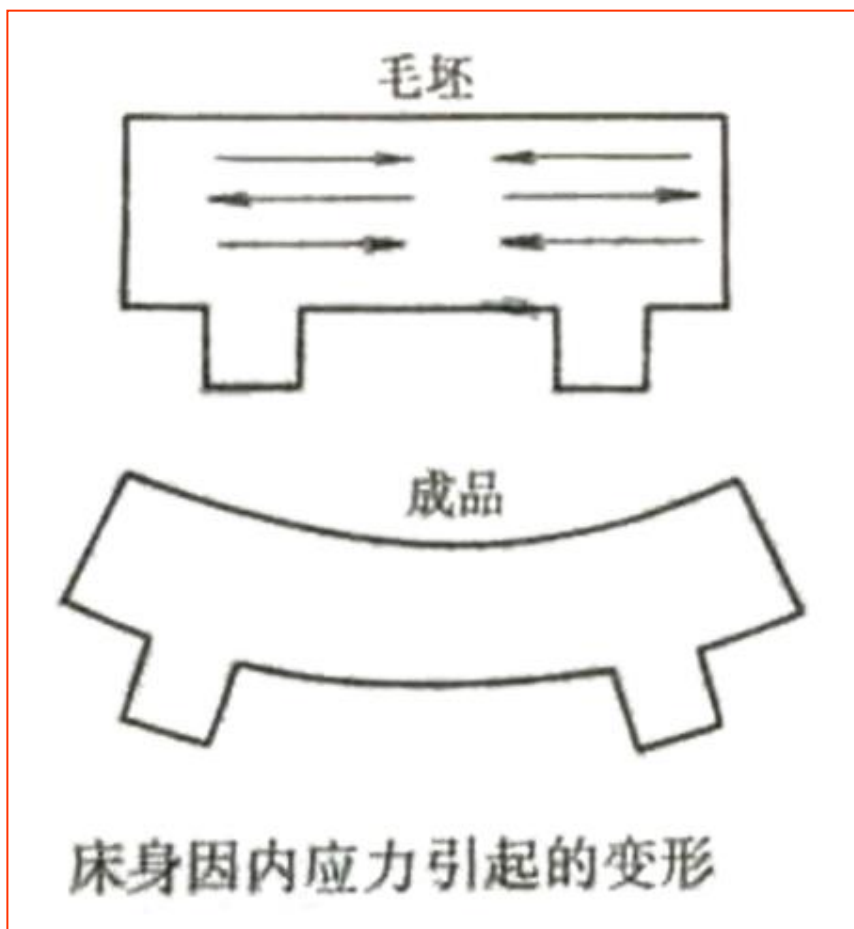
图 6-31 铸件因内应力而引起的变形

(2) 冷校直带来的内应力



冷校直引起的内应力

(3) 切削加工后的内应力



减少或消除内应力的措施

(1) 合理设计零件结构

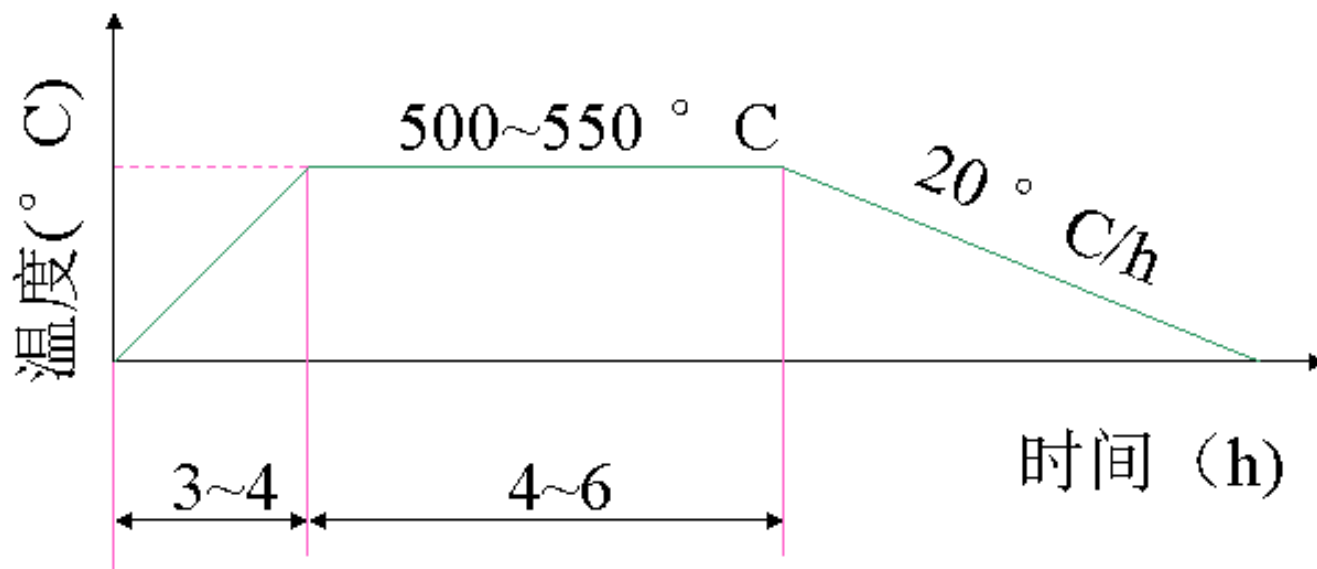
在设计零件结构时，应尽量做到壁厚均匀、结构对称，以减小内应力的产生。

(2) 合理安排工艺过程

工件上一些重要表面的粗、精加工分阶段安排，使工件在粗加工之后能有更多的时间通过变形使内应力重新分布，待工件充分变形之后再进行精加工，以减小内应力对加工精度的影响。

(3) 采取热处理及时效处理

- 铸件、锻件、焊接件在进行机械加工之前，应安排退火、回火；零件淬火后进行回火等热处理工序；
- 对精度要求高的零件如床身、丝杠、精密主轴等粗加工后进行时效处理；
- 对一些要求极高的零件如精密丝杠、标准齿轮、精密床身等要在每次切削加工后都进行时效处理；



九、测量误差和调整误差

Measurement errors and adjustment errors

1、测量误差

为测得值和被测得值之差。测量误差应控制在公差 $1/10 \sim 1/6$ 以内。影响因素很多：仪器、环境、操作者。

产生测量误差的原因主要由：量具量仪本身的制造误差及磨损，测量过程中环境温度的影响，测量者的测量读数误差，测量者施力不当引起量具量仪的变形等。



百分表



千分尺



园度仪

2、调整误差

为在机械加工过程中由于机床—夹具—刀具—工件工艺系统未调整到应有的正确位置而产生的误差。

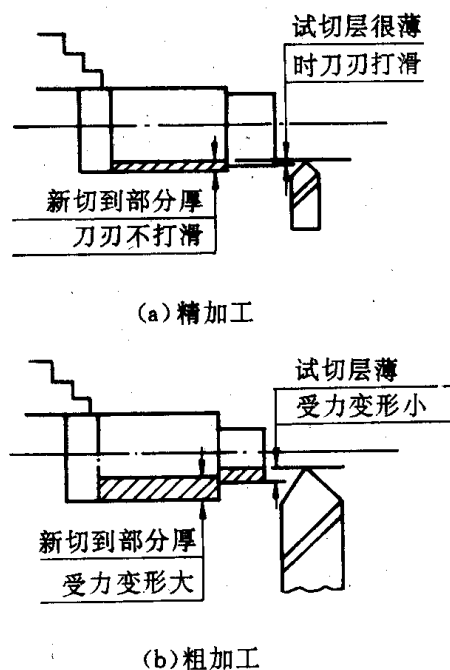


图 6-42 试切调整



解决措施：定位键、锥度配合等夹具定位元件；补充调整；专用调整仪器，主动测量装置。

第三节 机械加工的精度分析

Part 3 Comprehensive analyses of machining errors

回顾

- 系统误差 (systematic error)、
- 随机误差(random error)。

本节介绍

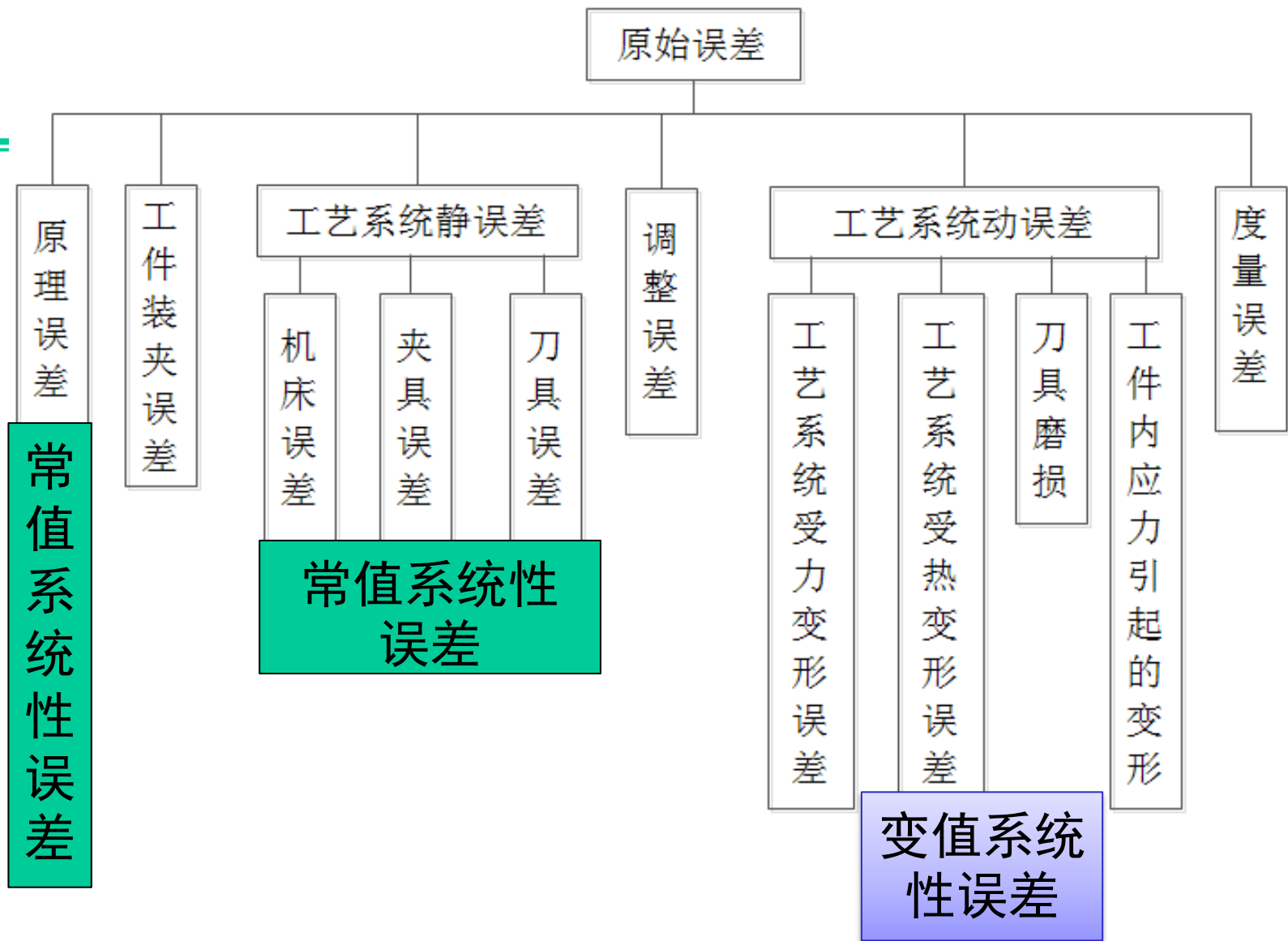
统计分析法

Using statistics



1、分布图分析法

2、控制图分析法



随机误差例如：毛坯误差（余量大小不一、硬度不均匀等）的复映、定位误差（基准面精度不一、间隙影响）、夹紧误差（夹紧力大小不一）、多次调整的误差、残余应力引起的变形误差等，都是随机性误差。

一、分布图分析方法

Analysis of errors according to distribution graph

基本原理

Basics principle

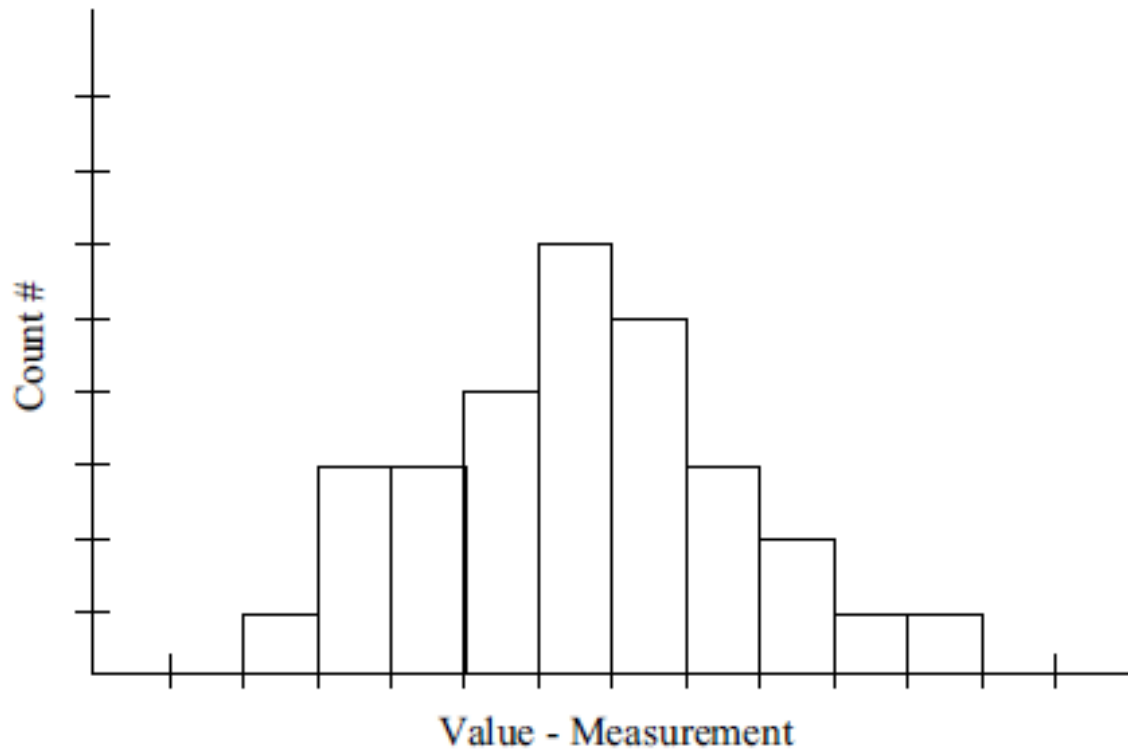


FIGURE Histogram (直方图)

(1) 采集样本

表4-3 测量数据

(单位:mm)

序号	尺寸	序号	尺寸	序号	尺寸	序号	尺寸	序号	尺寸
1	7.920	11	7.970	21	7.985	31	7.945	41	8.024
2	7.970	12	7.982	22	7.992	32	8.000	42	8.028
3	7.980	13	7.991	23	8.000	33	8.012	43	7.965
4	7.990	14	7.998	24	8.010	34	8.024	44	7.980
5	7.995	15	8.007	25	8.022	35	8.045	45	7.988
6	8.005	16	8.040	26	8.040	36	7.960	46	7.995
7	8.018	17	8.080	27	7.957	37	7.975	47	8.004
8	8.030	18	8.130	28	7.975	38	7.994	48	8.027
9	8.068	19	7.965	29	7.985	39	8.002	49	8.055
10	8.142	20	7.972	30	7.992	40	8.015	50	8.017

(2) 剔除异常数据

$$\bar{x} = 7.999875$$

(3) 确定尺寸分组数和组距

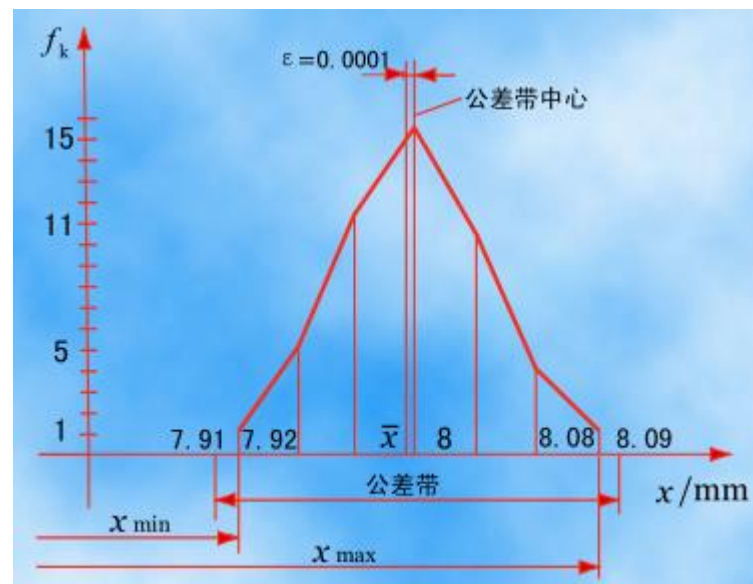
n	25~40	40~60	60~100	100	100~160	160~250	250~400	400~630	630~1000
k	6	7	8	10	11	12	13	14	15

由 $n=48$,取 $k=7$, 则组距

$$h = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{k} = \frac{8.080 - 7.920}{7} = 0.023$$

(4) 画出尺寸分布图

组号	尺寸间隔 $\Delta x/\text{mm}$	尺寸间隔中值 x_k/mm	频数 f_k
1	7.920~7.943	7.9315	1
2	7.943~7.966	7.9545	5
3	7.966~7.989	7.9775	11
4	7.989~8.012	8.0005	15
5	8.012~8.035	8.0235	10
6	8.035~8.058	8.0465	4
7	8.058~8.081	8.0695	2



(5) 判断加工误差性质

- 如果样本工件服从正态分布，就可以认为工艺过程中变值性系统误差很小（或不显著），工件尺寸分散由随机性误差引起，这表明工艺过程处于受控状态中。
- 如果样本工件尺寸不服从正态分布，可根据工件尺寸实际分布图分析是哪种变值性系统误差在显著地影响着工艺过程。
- 如果工件尺寸的实际分布中心与公差带中心有偏移，这表明工艺过程中有常值性系统误差存在。

表 5-1 箱体测量尺寸的变动范围
Table 5-1 Variation range of box measured dimensions

测量尺寸	测量尺寸及变动范围 mm			
	名义尺寸	统计法	变动范围	极值法
Measuring1	90	40.035	89.965~90.035	40.077
Measuring2	1754.05	40.965	1753.435~1754.615	40.1

均值

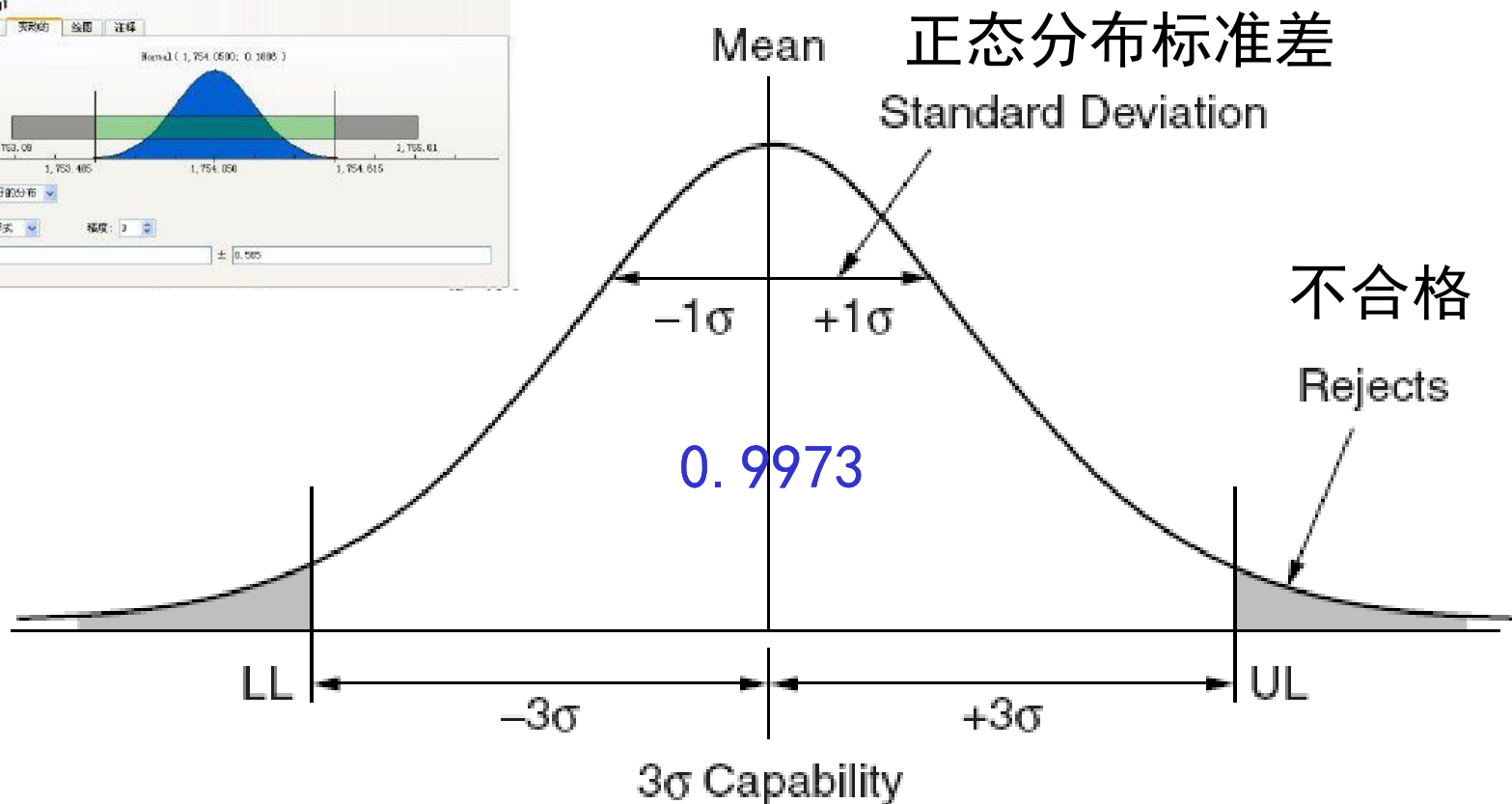
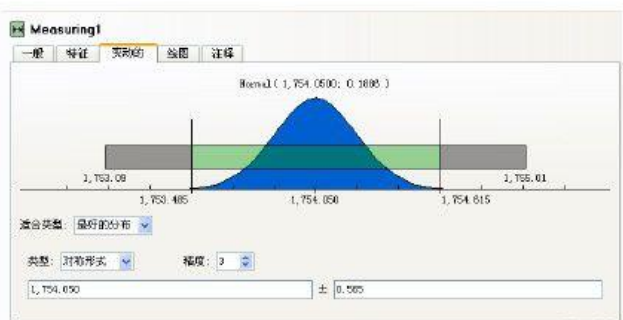


FIGURE Frequency plot of size distribution for a process with random error.

正态分布曲线

(1) 方程:

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}$$

式中 y ——频率

x ——工件尺寸

\bar{x} ——工件算术平均尺寸

σ ——均方根差（标准差）

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

(2) 特征:

① 以 $x = \bar{x}$ 为对称轴， \bar{x} 为总体均值——分布中心；

② 以 σ 为标准偏差， σ 小曲线陡而窄， σ 大，曲线平坦且宽。

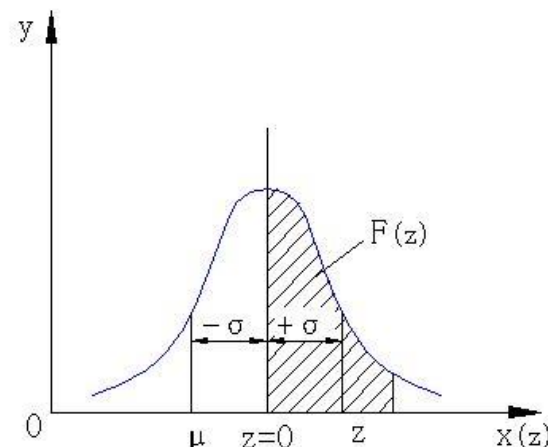


图6-39 正态分布曲线

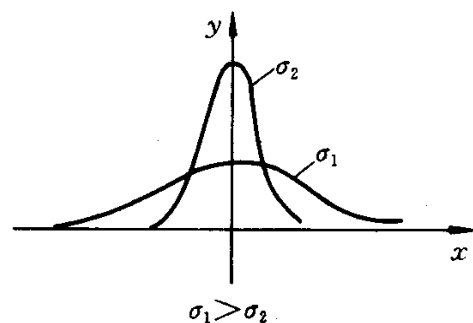


图 6-44 不同 σ 值的分布曲线

标准差大小对零件成品率的影响

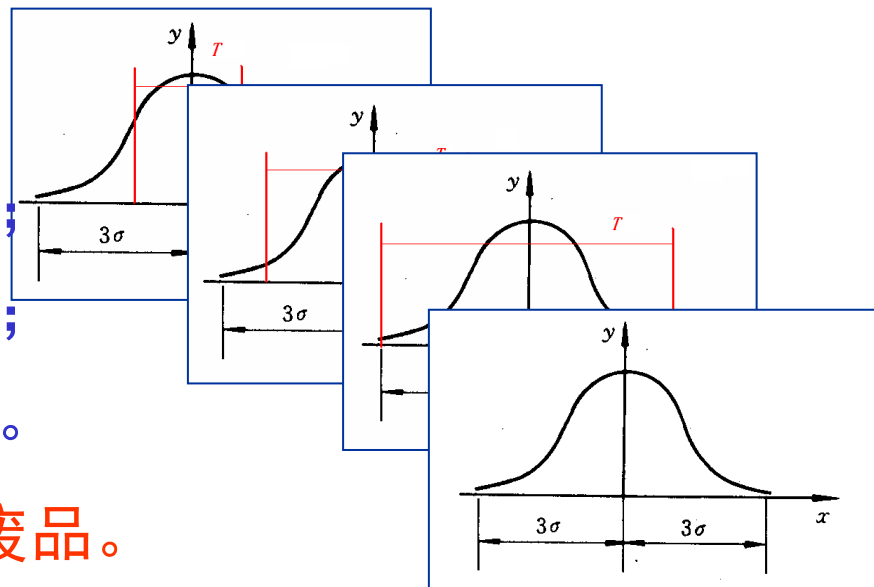
(1) 如果没有系统误差

① $\delta = 2\sigma$ 时，成品率为 0.6826；

② $\delta = 4\sigma$ 时，成品率为 0.9542；

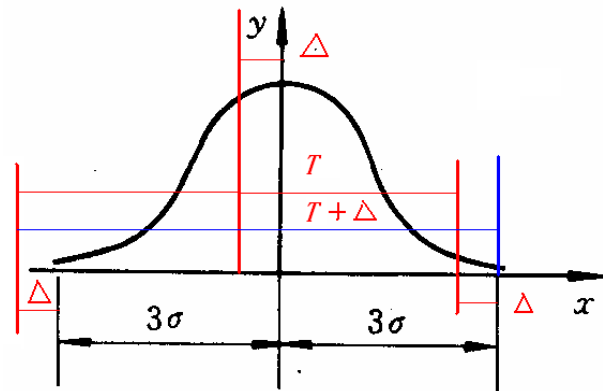
③ $\delta = 6\sigma$ 时，成品率为 0.9973。

④ $\delta \geq 6\sigma$ ：可以认为不会出现废品。

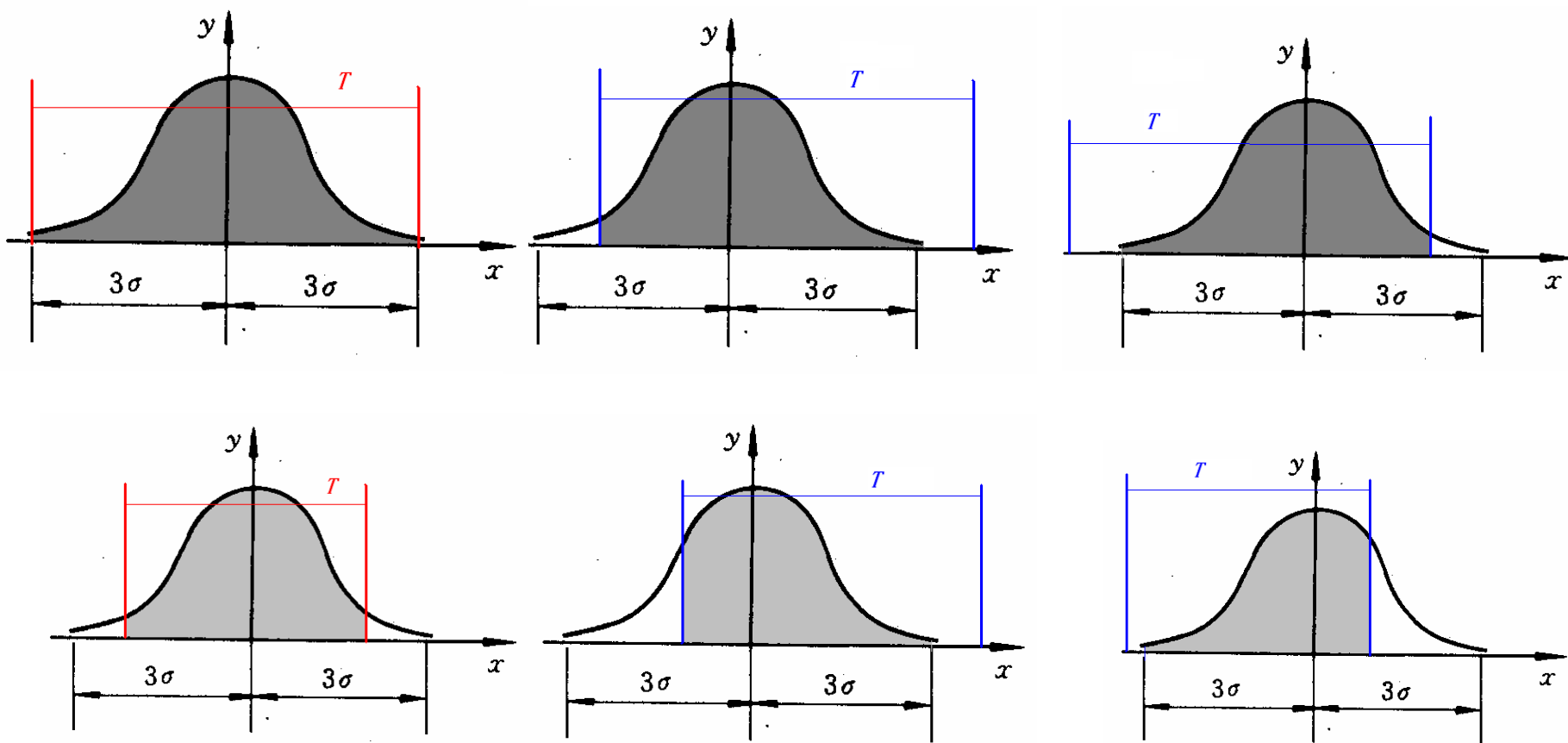


(2) 当有系统误差时

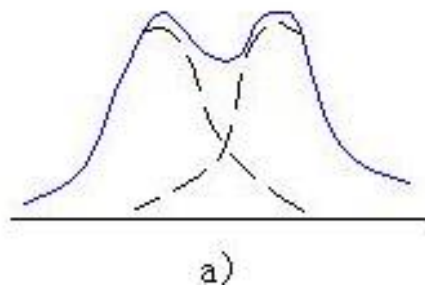
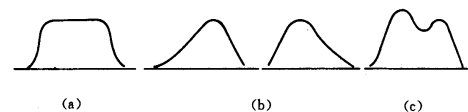
$\delta \geq 6\sigma + \Delta$ (系统误差)，不会出现废品。



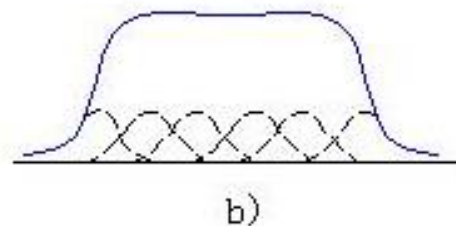
常见误差的形式



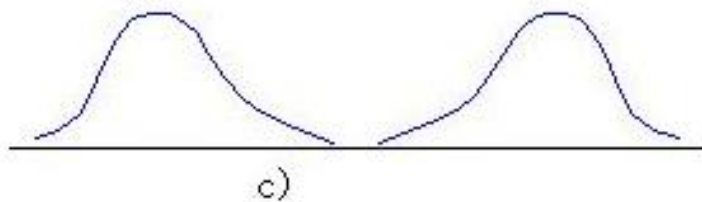
常见误差的其他分布形式



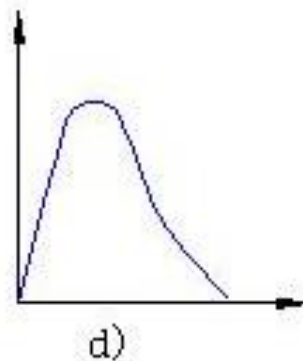
双峰分布：二次调整，二台机床加工，随机误差+常值系统性误差



平顶分布：刀具均匀磨损，随机误差+变值系统性误差。



偏态分布：操作者人为造成，系统未达到热平衡。

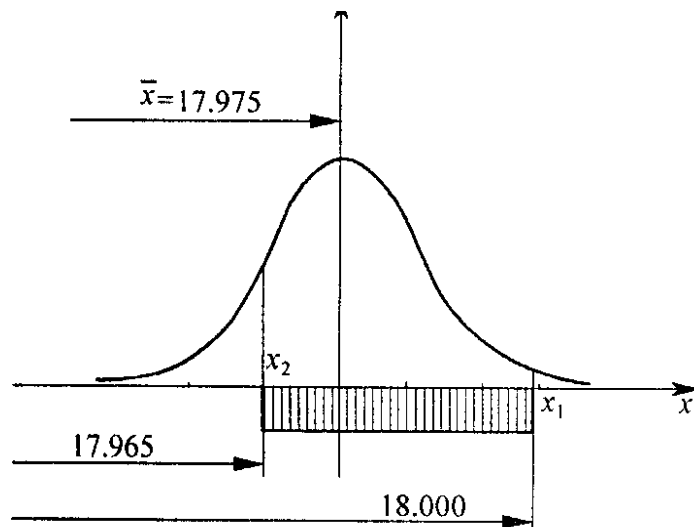


瑞利分布

实例

有一批小轴，其直径尺寸为 $\phi 18_{-0.035}^0$ mm，加工后尺寸属正态分布，测量计算得一批工件直径的平均值为 $\bar{x}=17.975$ mm，均方差 $\sigma=0.01$ mm。试计算合格品率和废品率，分析废品产生的原因，指出减少废品率的措施。

解：（1）画尺寸分布曲线与公差带间的关系如图

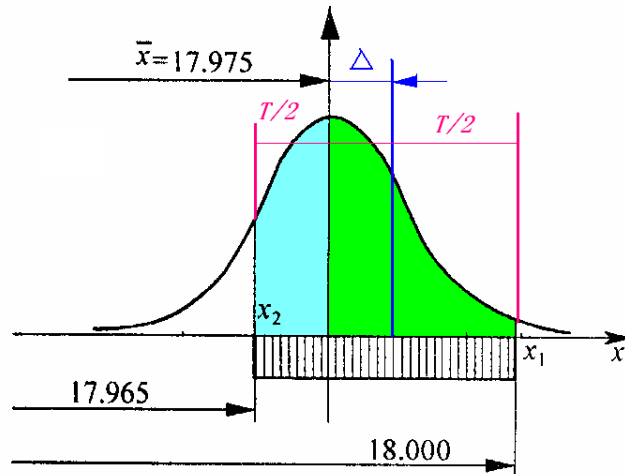


(2) 设计尺寸写成对称形式

$$\phi 18_{-0.035}^0 = \phi 17.9825 \pm 0.0175$$

(3) 计算系统误差

$$\Delta = 17.9825 - 17.975 = 0.0075 \text{ mm}$$



(4) 计算合格品率和废品率

$$x_1 = \frac{T}{2} + \Delta = 0.025 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad \frac{x_1}{\sigma} = \frac{0.025}{0.01} = 2.5 \quad \Rightarrow \quad A_1 = 0.9876$$

$$x_2 = \frac{T}{2} - \Delta = 0.01 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad \frac{x_2}{\sigma} = \frac{0.01}{0.01} = 1 \quad \Rightarrow \quad A_2 = 0.6826$$

$$\text{故合格品率为 } A = \frac{1}{2}(A_1 + A_2) = 83.51\% \quad \text{废品率为 } 1 - A = 16.49\%$$

(5) 分析产生废品的原因:

正态分布函数表 (局部)

$\frac{x}{\sigma}$	A	$\frac{x}{\sigma}$	A	$\frac{x}{\sigma}$	A	$\frac{x}{\sigma}$	A
0	0.000 0	0.3	0.235 9	1.5	0.866 4	3.0	0.997 3
0.1	0.074 6	0.5	0.383 0	2.0	0.954 2	3.5	0.999 4
0.2	0.185 6	1.0	0.682 6	2.5	0.987 6	4.0	0.999 9

工序能力指数(Process capability index)

很重要!

(1) 工序能力指数 C_p : 衡量工序能力满足质量要求的程度。

(2) 公式

$$C_p = \frac{T(1-K)}{6\sigma}$$

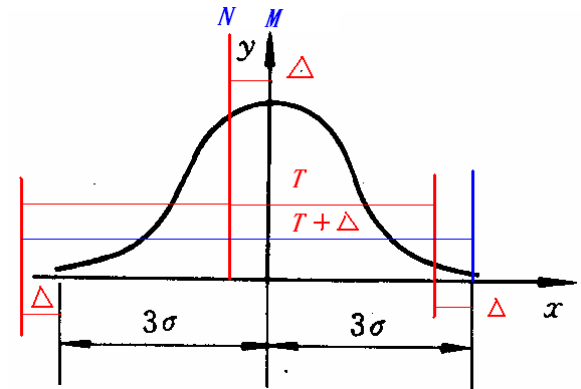
式中

T——工件公差;

K—— $|M-N|/(2T)$;

M——分布曲线中心;

N——公差带中心。



(3) 工序等级及其含义

工序能力系数	工序等级	说明
$C_p > 1.67$	特级	工艺能力高, 可以允许有异常波动, 不一定经济
$1.67 \geq C_p > 1.33$	一级	工艺能力足够, 可以允许有一定的异常波动
$1.33 \geq C_p > 1.00$	二级	工艺能力勉强, 必须密切注意
$1.00 \geq C_p > 0.67$	三级	工艺能力不足, 可能出现少量不合格品
$0.67 \geq C_p$	四级	工艺能力很差, 必须加以改进

实例

$$C_p = \frac{T(1-K)}{6\sigma}$$

已知某批量加工零件，经过测量得出样本均值 $\bar{x}=7.92524$ ，标准差 $\sigma=0.00519$ ，图纸标注尺寸为 $\Phi 8[-0.05, -0.10]$ ，请计算工序能力指数？

解：（1）计算工件的公差
公差带上限： $S_U=8-0.05=7.95$
公差带下限： $S_L=8-0.10=7.90$
工件公差： $T=7.95-7.90=0.05$

（2）计算公差带中心和分布曲线中心

公差带中心： $M=(7.95+7.90)/2=7.925$

分布曲线中心： $\bar{M}=7.92524$

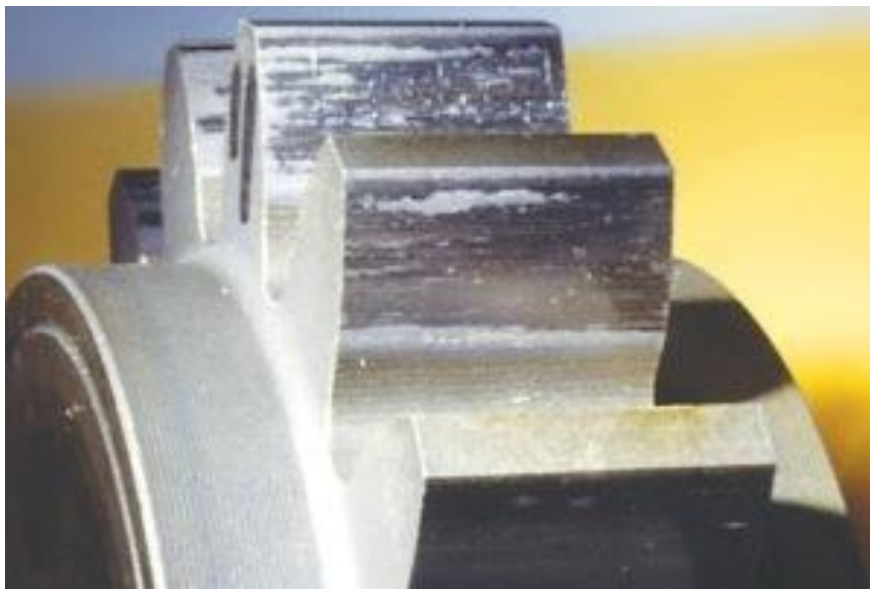
（3）计算偏移系数 $K=|M-\bar{M}|/(2T)=0.00024/0.1=0.0024$

（4）计算工序能力指数

$$C_p=(1-K)T/(6\sigma)=0.9976\times 0.05/(6\times 0.00519)=1.60$$

分布图法的缺点

没有考虑加工顺序，无法将随时间变化的系统误差和随机误差区分开来，只能加工完一批工件后才能分析。而控制图法(点图分析法)可以克服以上的缺点。



二、控制图分析方法

Statistical process control , SPC
(Process Behavior Charts, Control Charts)



什么是控制图？

(1) 各种控制图

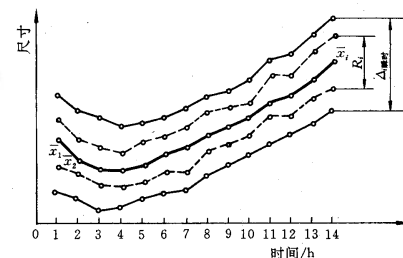
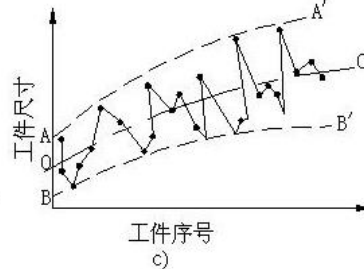
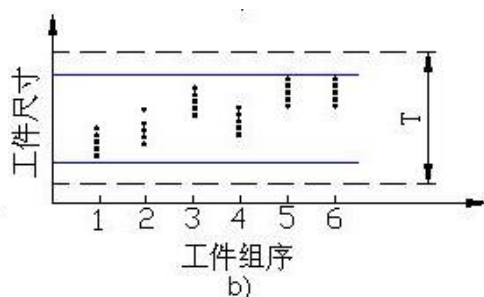
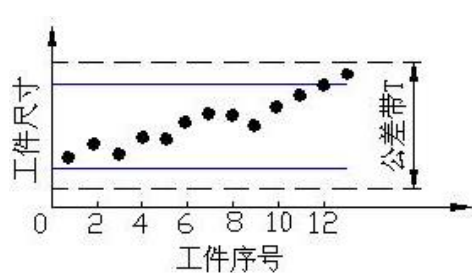


图 6-46 点图

最常用的控制图是均值—极差控制图（ $\bar{x}-R$ 图）

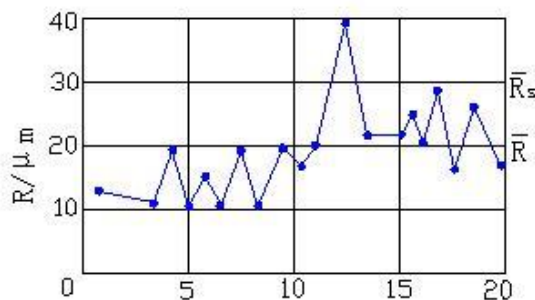
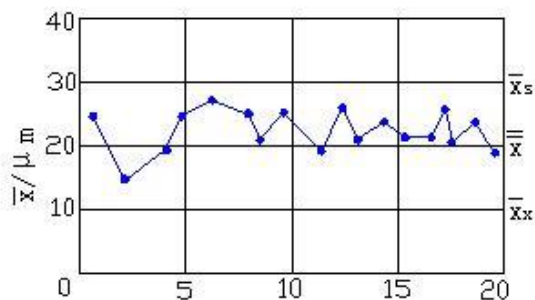
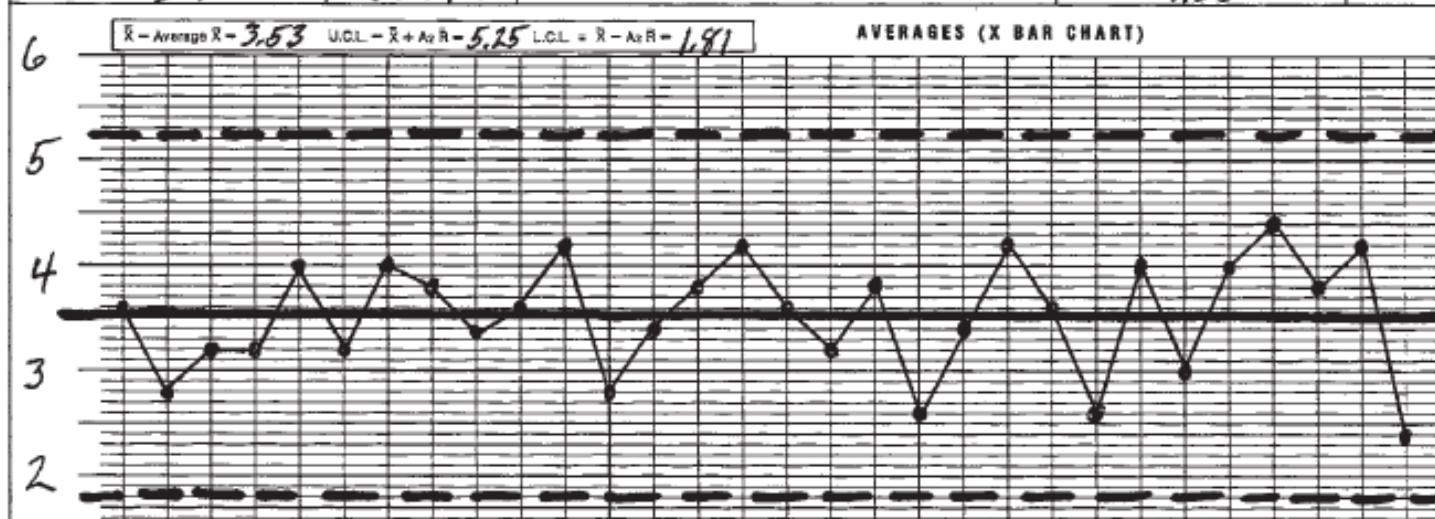


图6-44 $\bar{x}-R$ 点图

包含了平均值控制图（ \bar{x} 图）和极差控制图（ R 图）

CONTROL CHART

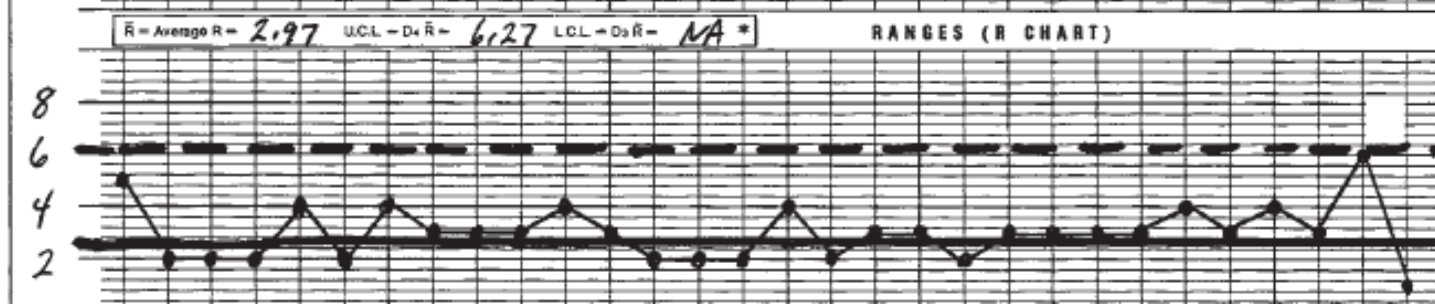
PLANT RAM Q	DEPT Bead Box	OPERATION 001	DATE CONTROL LIMITS CALCULATED 07-14-02	ENGINEERING SPECIFICATION size	PART NO. color	CONTROL ITEM (✓) YES NO
MACH. NO. #2	DATES 07-14-02	CHARACTERISTIC color scale	SAMPLE SIZE/FREQUENCY n=5	PART NAME bead size		



DATE CONTROL LIMITS CALCULATED
07-14-02

ACTION ON SPECIAL CAUSES

- * ANY POINT OUTSIDE OF THE CONTROL LIMITS
- * A RUN OF 7 POINTS-ALL ABOVE OR ALL BELOW THE CENTRAL LINE.
- * A RUN OF 7 INTERVALS UP OR DOWN.
- * ANY OTHER OBVIOUSLY NON-RANDOM PATTERN



ACTION INSTRUCTIONS

-
-
-
-
-

SUBGROUP SIZE	A ₂	D ₃	D ₄
2	1.88	*	3.27
3	1.02	*	2.57
4	.73	*	2.28
5	.56	*	2.11
6	.48	*	2.00
7	.42	.08	1.92
8	.37	.14	1.86
9	.34	.18	1.82
10	.31	.22	1.78

DATE	TIME	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
READINGS	1	3	3	4	4	3	4	3	4	4	2	4	4	4	5	3	2	4	5	1	4	5	5	7	3	4	3	2	4	5	2
	2	5	2	3	3	3	2	2	5	3	5	3	1	3	3	4	5	4	5	2	4	2	3	6	4	5	3	4	3	7	2
	3	6	3	3	2	2	4	3	2	2	4	4	4	2	3	5	1	2	4	2	4	5	5	2	6	3	4	5	6	3	2
	4	3	2	2	4	5	3	5	4	5	2	7	4	4	5	4	5	2	3	4	2	4	3	4	3	2	6	6	2	4	3
	5	1	4	4	3	7	3	7	4	3	5	3	1	4	3	5	5	4	2	4	3	5	2	4	4	1	4	5	4	2	3
SUM		18	14	16	16	20	16	20	19	17	18	21	14	17	19	21	18	16	19	13	17	21	18	23	20	15	20	22	19	21	12
\bar{X} - NO. OF		3.6	2.8	3.2	3.2	4.0	3.2	4.0	3.8	3.4	3.6	4.2	2.8	3.4	3.8	4.2	3.6	3.2	3.8	2.6	3.4	4.2	3.6	2.6	4.0	3.0	4.0	4.4	3.8	4.2	2.4
\bar{R} - HIGHEST		5	2	2	2	4	2	4	3	3	3	4	3	2	2	2	4	2	3	3	2	3	3	3	3	4	3	4	3	5	1
LOWEST																															

THE PROCESS MUST BE IN CONTROL BEFORE CAPABILITY CAN BE DETERMINED.

\bar{X} 106
 \bar{R} 89

* For sample sizes of less than seven, there is no lower control limit for ranges.

FIGURE 57.4 X-bar and R chart.

分析步骤

(1) 抽取预备数据

(2) 计算均值 \bar{x} 和极差 R :

$$\bar{\bar{x}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$R = x_{\max} - x_{\min}$$

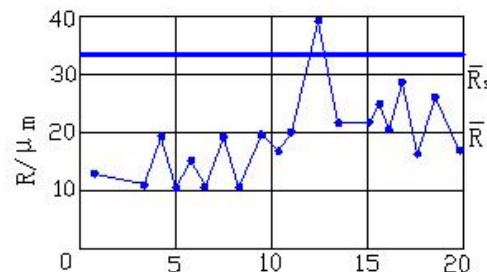
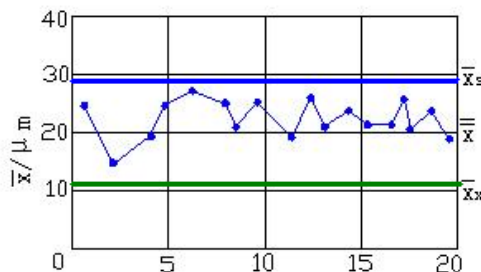


图6-44 \bar{x} - R 点图

(3) 计算均值 \bar{x} 的均值 $\bar{\bar{x}}$, R 的均值 \bar{R} , 以及方差

(4) 计算中心线和控制界限:

平均值控制图:

极差控制图

中心线:

$$CL_X = \bar{\bar{X}}$$

$$CL_R = \bar{R}$$

上控制线:

$$UCL_X = \bar{\bar{X}} + 3\sigma_{\bar{x}}$$

$$UCL_R = \bar{R} + 3\sigma_R$$

下控制线:

$$LCL_X = \bar{\bar{X}} - 3\sigma_{\bar{x}}$$

$$LCL_R = 0$$

(5) 作图

(6) 判断生产过程是否处于统计控制状态

如何判断生产过程是否处于统计控制状态？

表 正常波动与异常波动标志

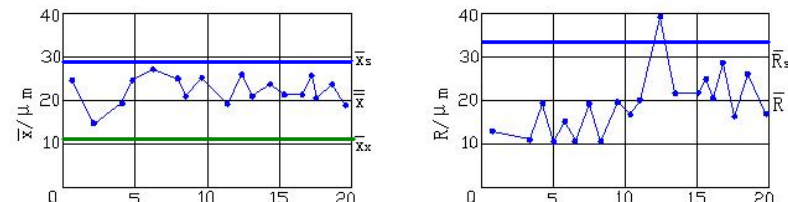
正常波动标志	异常波动标志
<div>1、没有点子超出控制线</div> <div>2、大部分点子在中线上下波动，小部分点在控制线附近</div> <div>3、点子没有明显的规律性</div> <div></div>	<div>1、有点子超出控制线</div> <div>2、点子密集在中线上下附近</div> <div>3、点子密集在控制线附近</div> <div>4、连续 7 点以上出现在中线一侧</div> <div>5、连续 11 点中有 10 点出现在中线一侧</div> <div>6、连续 14 点中有 12 点以上出现在中线一侧</div> <div>7、连续 17 点中有 14 点以上出现在中线一侧</div> <div>8、连续 20 点中有 16 点以上出现在中线一侧</div> <div>9、点子有上升或下降倾向</div> <div>10、点子有周期性波动</div>

图6-44 \bar{x} -R点图

实例

对某产品的加工质量进行控制，每小时抽检一批，每批抽检5个样品，一共抽检20批，其数据如表所示，试利用平均值-极差控制图法进行分析。

表 某产品的加工质量特性值统计表

批号	测量值					\bar{x}	R
	1	2	3	4	5		
1	4.0	2.6	3.2	3.1	2.1	3.0	1.9
2	3.2	3.3	2.7	3.4	2.1	2.9	1.3
3	3.5	2.8	3.0	2.8	2.4	2.9	1.1
4	3.9	2.4	3.3	3.1	3.2	3.2	1.5
5	3.0	3.0	2.1	2.2	3.3	2.7	1.2
6	3.7	2.0	2.5	2.4	2.4	2.6	1.7
7	3.9	2.1	2.7	3.4	3.0	3.0	1.8
8	3.4	3.6	3.0	2.4	3.5	3.2	1.2
9	4.4	2.4	2.2	2.4	2.5	2.8	2.2
10	3.3	2.4	2.6	2.9	2.8	2.8	0.9

11	3.3	2.8	3.0	3.0	3.1	3.0	0.5
12	3.6	2.5	3.3	3.5	2.8	3.1	1.1
13	3.4	3.3	2.0	3.0	3.1	3.0	1.4
14	3.9	3.1	3.5	2.6	2.8	3.2	1.3
15	4.2	2.7	2.9	2.9	2.5	3.0	1.7
16	3.6	2.6	2.4	2.5	2.2	2.7	1.4
17	4.0	3.2	2.4	3.0	3.0	3.1	1.6
18	3.1	2.9	3.5	2.3	2.8	2.9	1.2
19	4.6	3.7	3.4	2.2	2.5	3.3	2.4
20	3.9	3.0	3.0	3.2	2.6	3.1	1.3

- 解： (1) 计算均值 $\bar{\bar{x}}$ 和极差 \bar{R} ，将结果填入表中。
(2) 计算均值 $\bar{\bar{x}}$ 的均值， \bar{R} 的均值，以及方差

$$\bar{\bar{x}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^K \bar{x}_i = \frac{1}{20} (3.0 + 2.9 + \cdots + 3.1) = 2.98$$

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^K R_i = \frac{1}{20} (1.9 + 1.3 + \cdots + 1.3) = 1.44$$

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2} = 0.19 \quad \sigma_R = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} = 1.44$$

- (3) 计算中心线和控制界限：

平均值控制图：

极差控制图

上控制线： $UCL_X = \bar{\bar{X}} + 3\sigma_{\bar{x}} = 2.98 + 3 \times 0.19 = 3.55$

$$UCL_R = \bar{R} + 3\sigma_R = 1.44 + 3 \times 0.44 = 2.76$$

中心线： $CL_X = \bar{\bar{X}} = 2.98$

$$CL_R = \bar{R} = 1.44$$

下控制线： $LCL_X = \bar{\bar{X}} - 3\sigma_{\bar{x}} = 2.98 - 3 \times 0.19 = 2.41$

$$LCL_R = \bar{R} - 3\sigma_R = 1.44 - 3 \times 0.44 = 0.12$$

(5) 作图

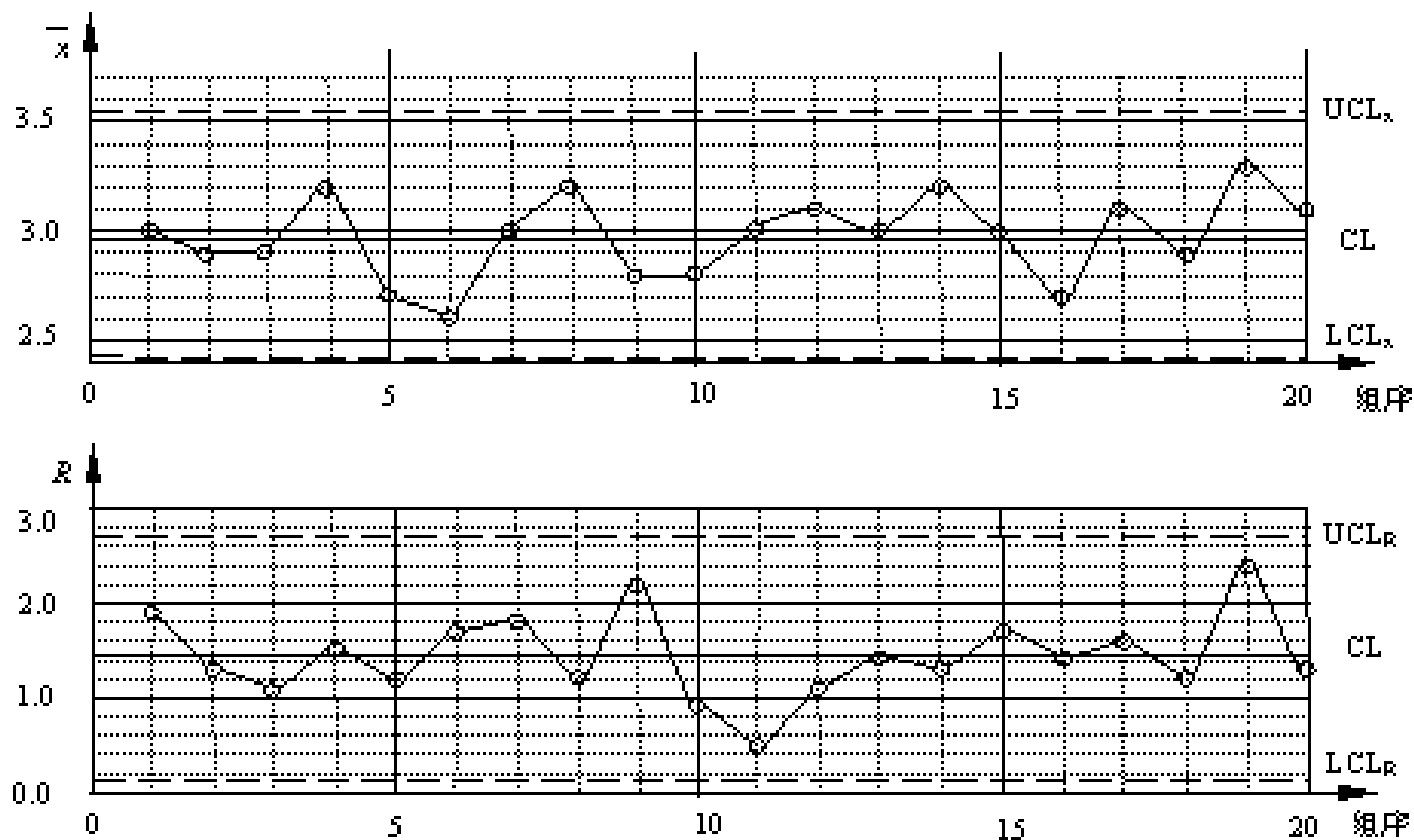
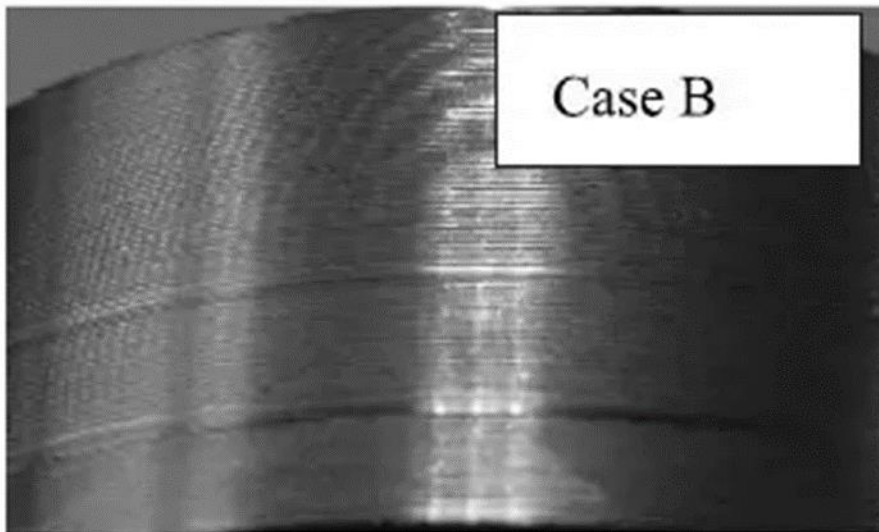
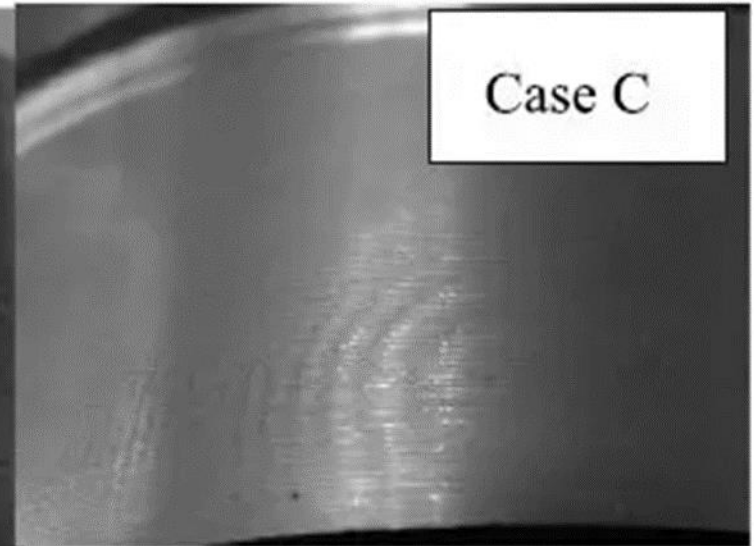
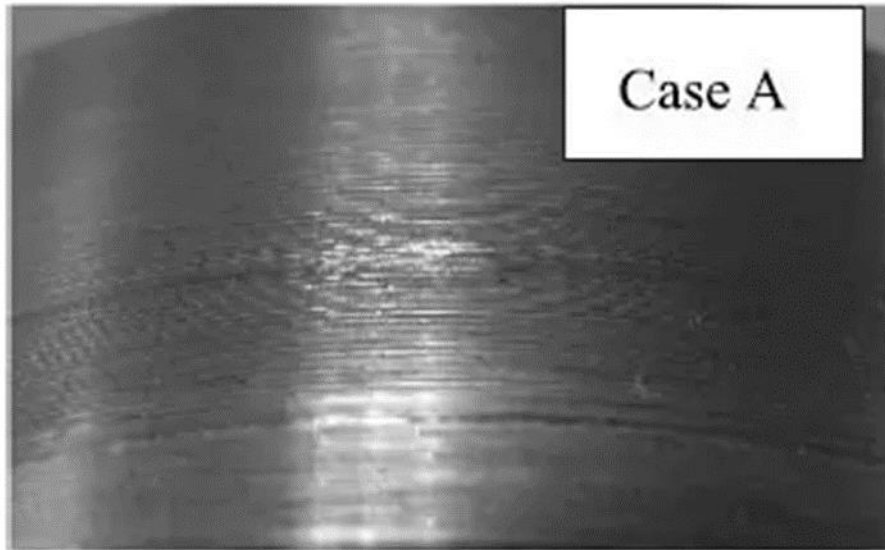


图3-56 例题中的均值—极差控制图

(6) 判断生产过程是否处于统计控制状态

第四节 机械加工表面质量的基本概念

Part 4 Basic concepts of surface quality in mechanical manufacture

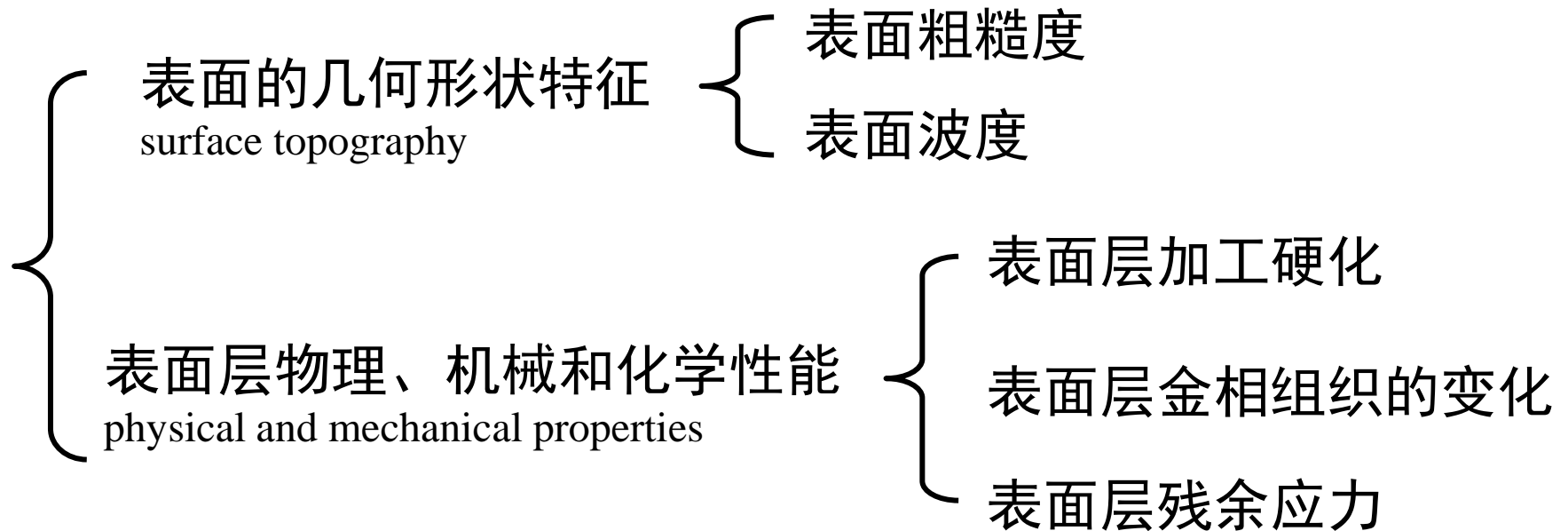


一、表面微观几何特性和表面层性能

1、表面质量(Surface quality)定义

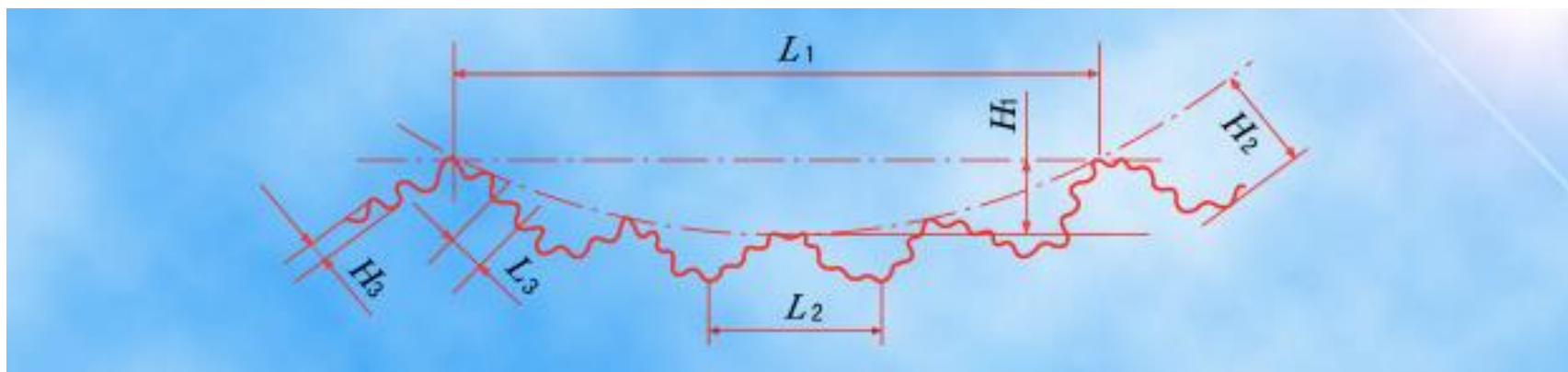
表面质量是指机械零件在加工后的表面层状况与表面层技术要求的符合程度。

2、表面质量包括的内容：

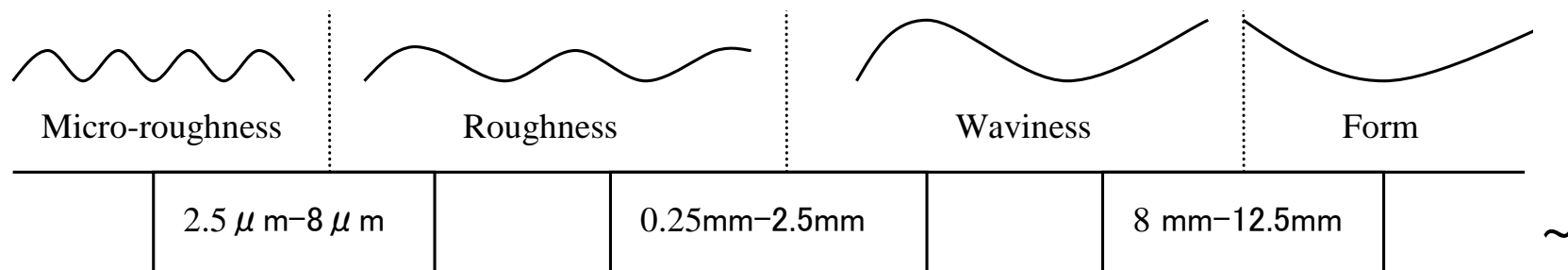


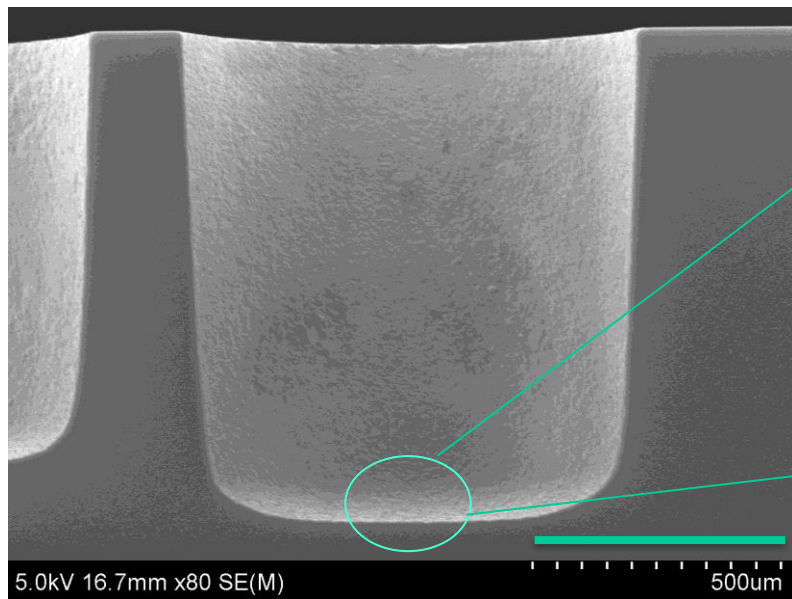
加工表面的几何形貌

Surface topography

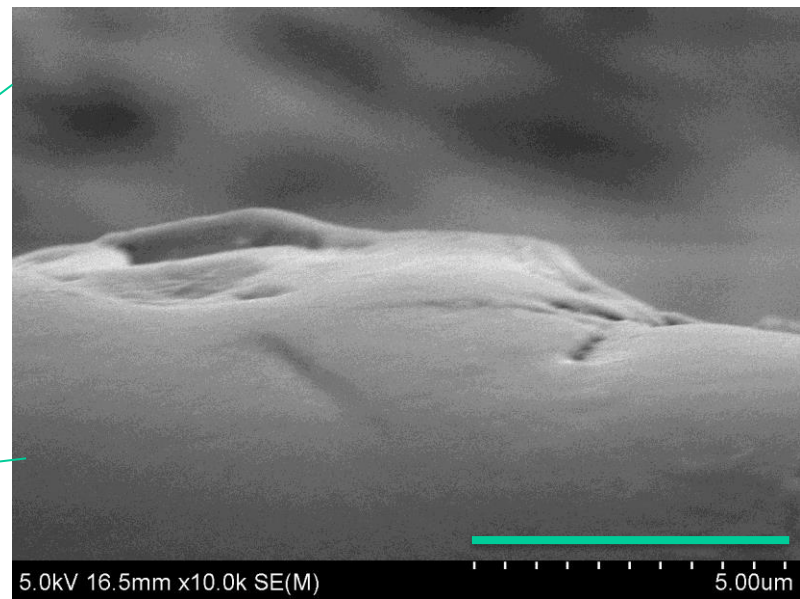


根据加工表面轮廓的特征（波距 L 与波高 H 的比值），可将表面轮廓分为以下三种： $L/H > 1000$ 称为宏观几何形状误差，例如圆度误差、圆柱度误差等，它们属于加工精度范畴； $L/H = 50 \sim 1000$ ，称为波纹度，它是由机械加工振动引起的； $L/H < 50$ ，称为微观几何形状误差，亦称表面粗糙度。





宏观表面轮廓特征



微观表面轮廓特征

$$R_a \approx 0.7\mu\text{m}$$

不同加工方法所能达到的表面粗糙度

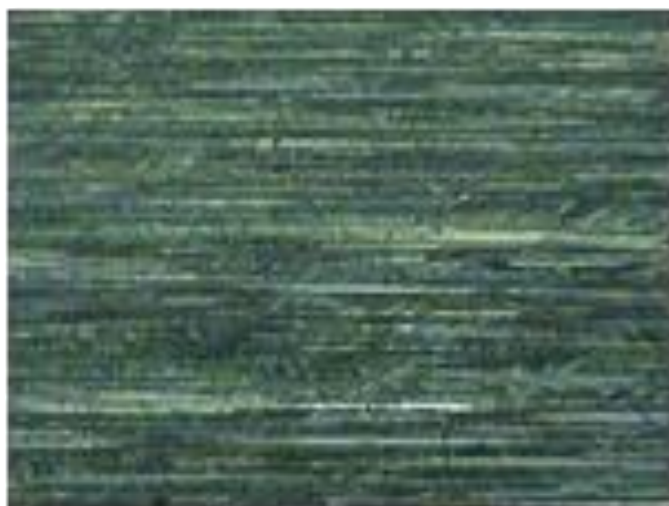
表面特征	表面粗糙度(Ra)数值	加工方法举例
明显可见刀痕	Ra100、Ra50、Ra25	粗车、粗刨、粗铣、 钻孔
微见刀痕	Ra12.5、Ra6.3、 Ra3.2	精车、精刨、精铣、 粗铰、粗磨
看不见加工痕迹， 微辨加工方向	Ra1.6、Ra0.8、Ra0.4	精车、精磨、精铰、 研磨
暗光泽面	Ra0.2、Ra0.1、 Ra0.05	研磨、珩磨、超精磨、 抛光



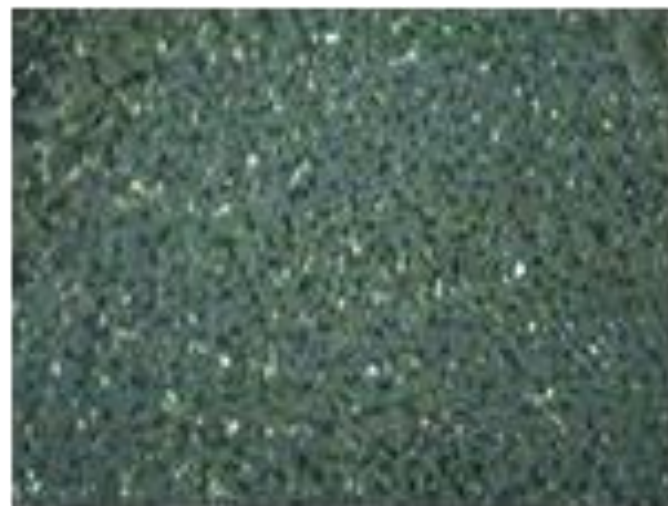
a 机械磨削



b 精密电火花加工



c 电化学抛光前



d 电化学抛光后

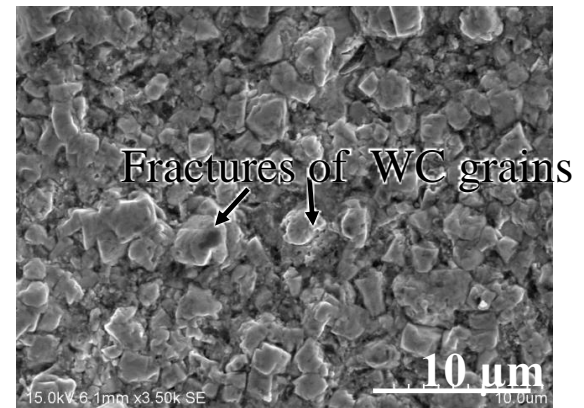
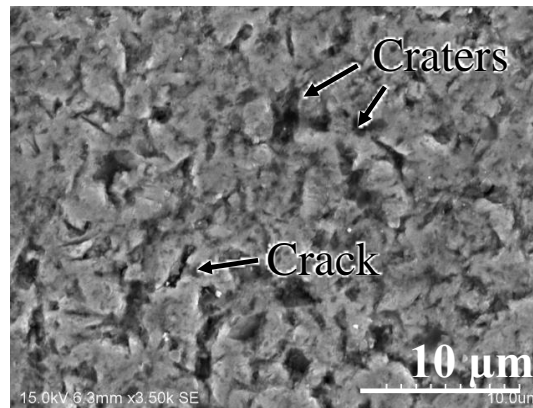
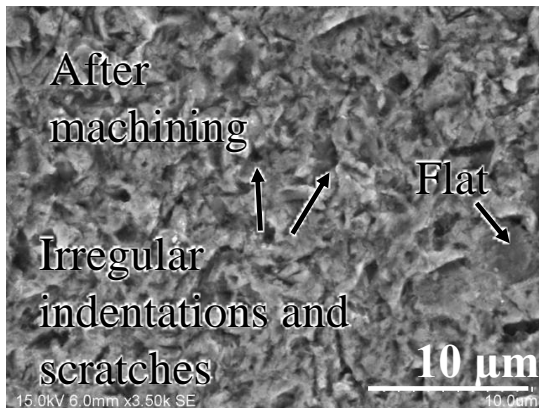
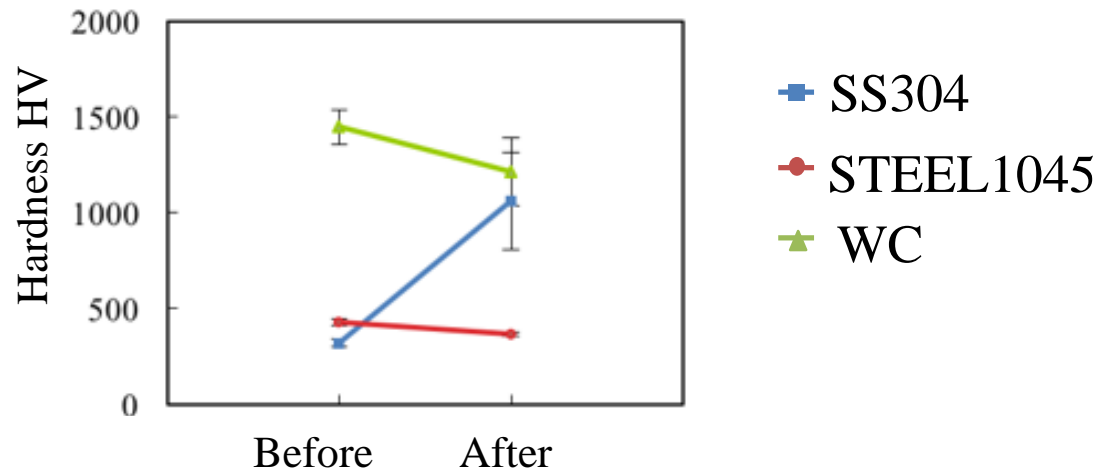
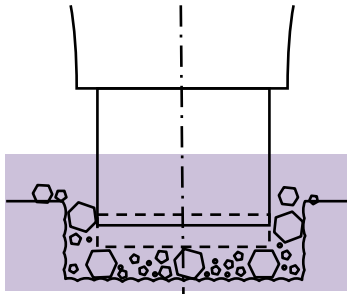
各种加工方法所得表面形貌对比

表面层物理、力学和化学性能

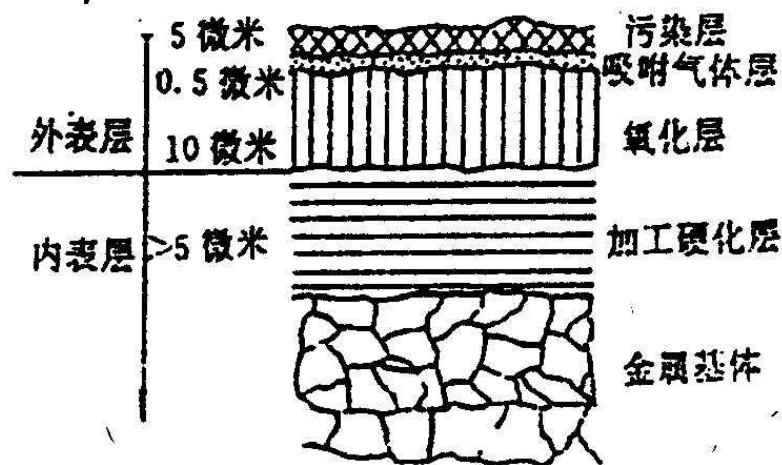
Physical, chemical and mechanical properties

表面层冷作硬化

机械加工过程中表面层金属产生强烈的塑性变形，使表面层的硬度、强度增加，塑性减小，统称为冷作硬化。



①加工表面：

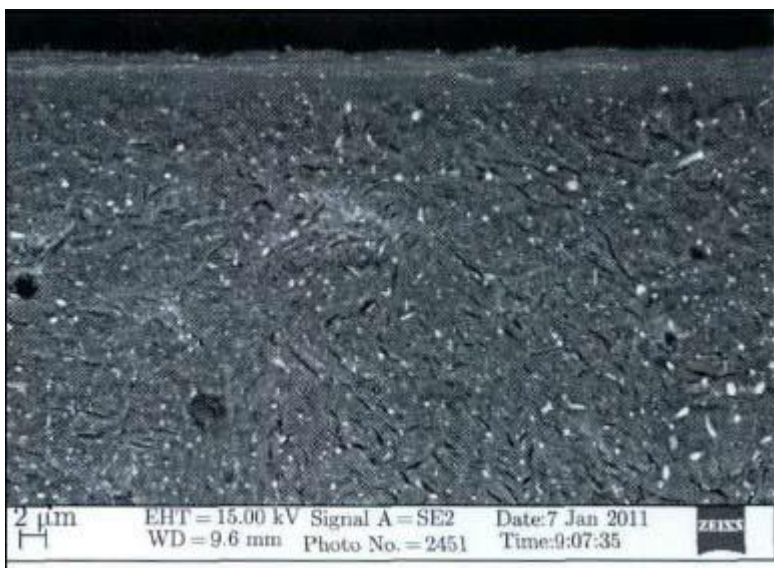


金属表面的表层组成的示意图

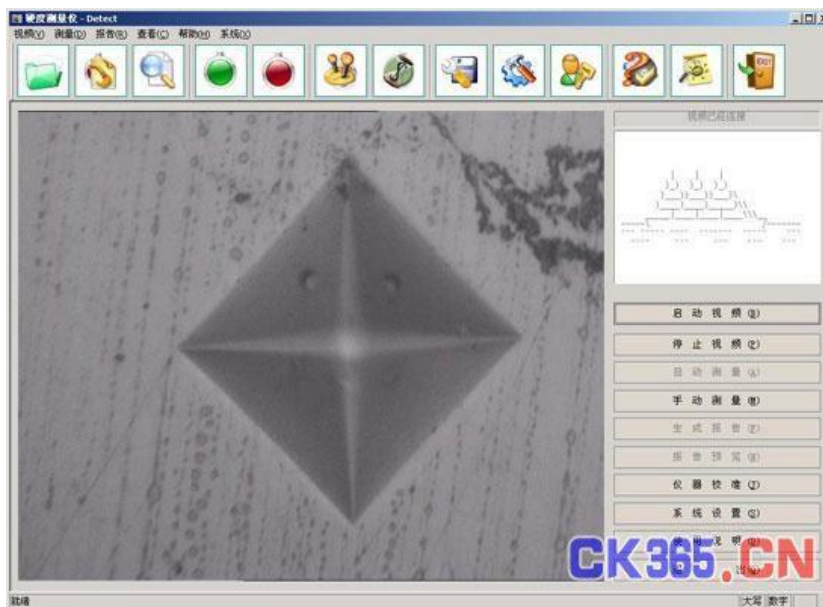
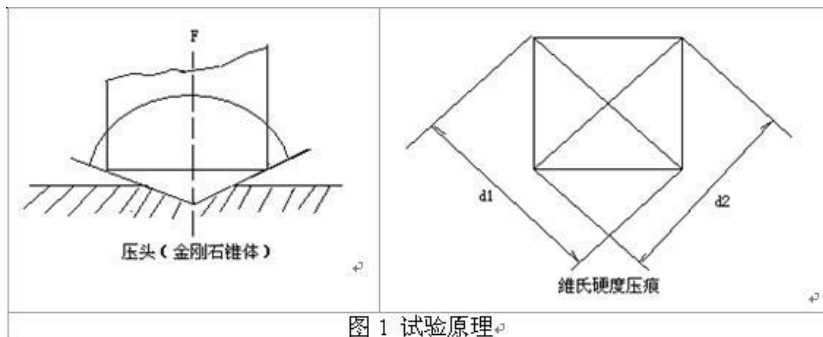
②表面层显微硬度 H 、硬化层深度 hd 、硬化程度 N :

N : 加工表面的显微硬度增加值对原始基体显微硬度比值的百分数。

$$N = \frac{H_{Surface} - H_{Substrate}}{H_{Substrate}}$$



轴承钢磨削表面



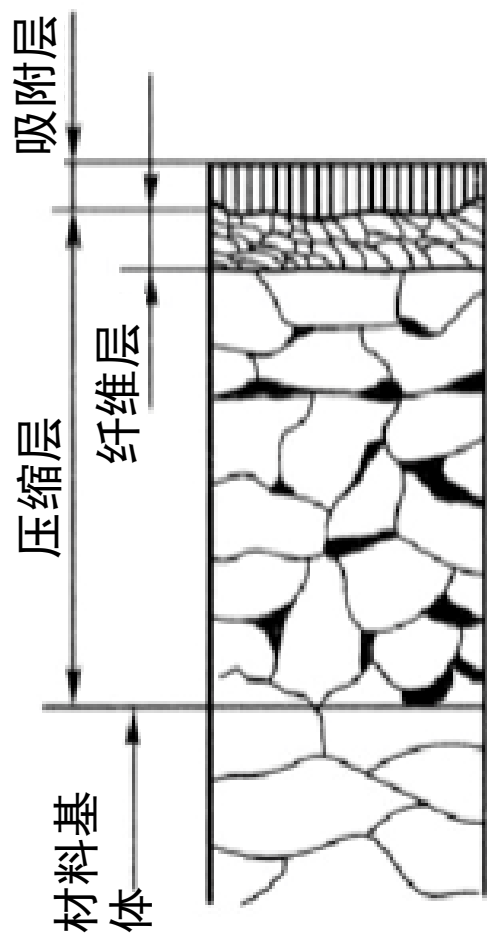
维氏硬度测量

表面层金相组织变化

机械加工过程中，在工件的加工区域，温度会急剧升高，当温度升高到超过工件材料金相组织变化的临界点时，就会发生金相组织变化。如磨削时常发生的磨削烧伤。

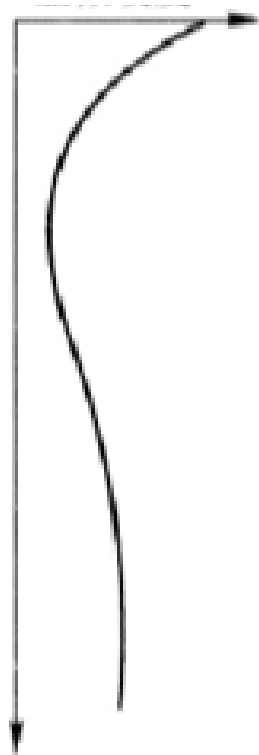
表面层残余应力

指机械加工过程中由于切削变形和切削热等因素的作用在工件表层材料中产生的内应力。残余应力超过材料强度极限就会产生表面裂纹。



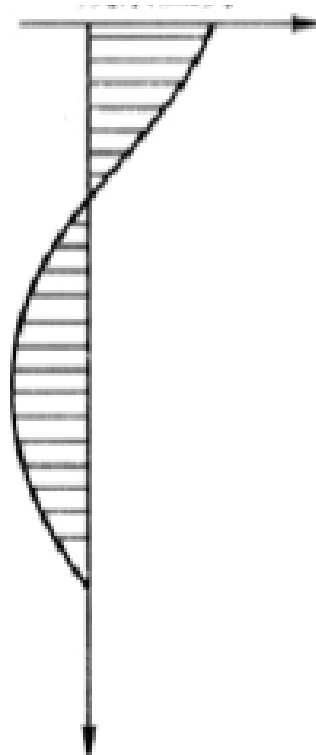
表面金相组织变化

显微硬度



表面层冷作硬化

残余应力



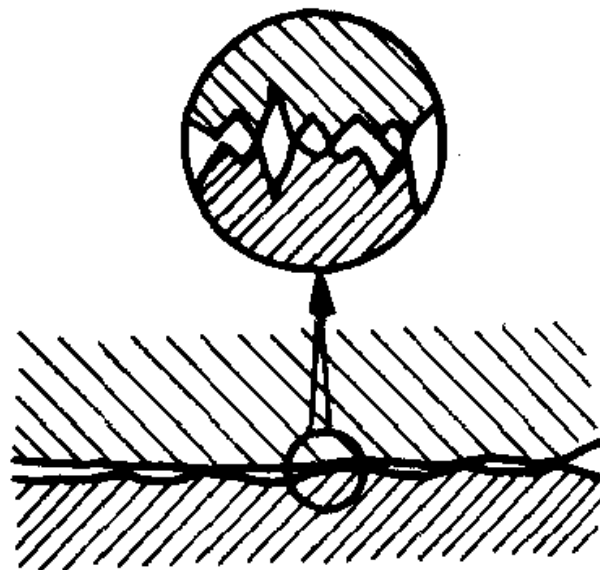
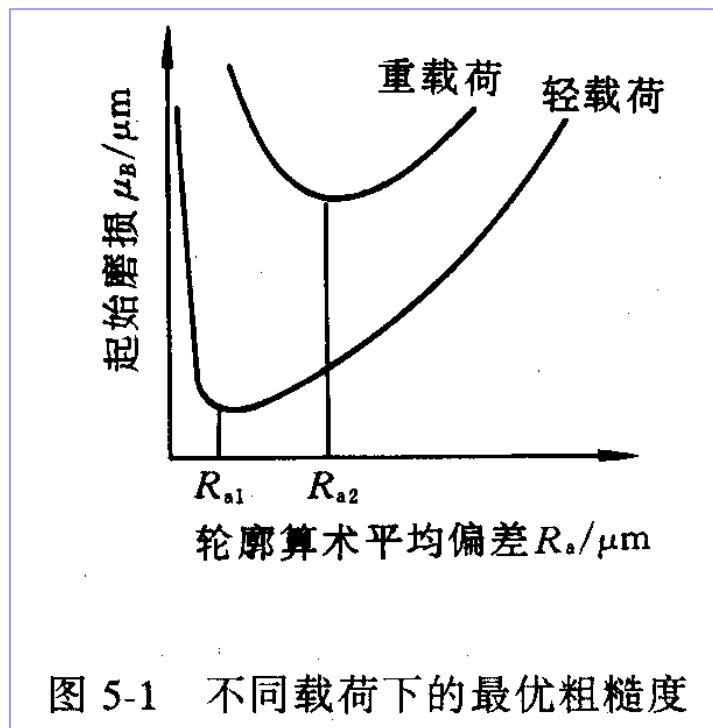
表面层残余应力

二、机械加工表面质量对零件使用性能的影响

1、表面质量对零件耐磨性的影响

Surface roughness influences on the anti-wear properties of work piece

①初始粗糙度的影响：最佳值 $0.32 \sim 1.2 \mu\text{m}$



②表面层加工硬化的影响

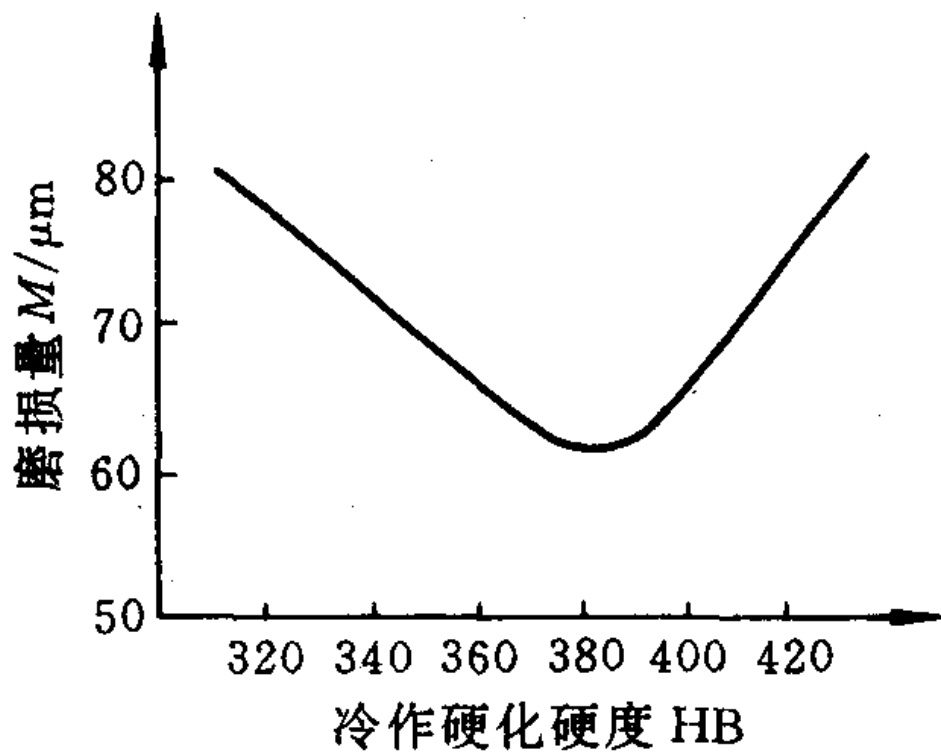
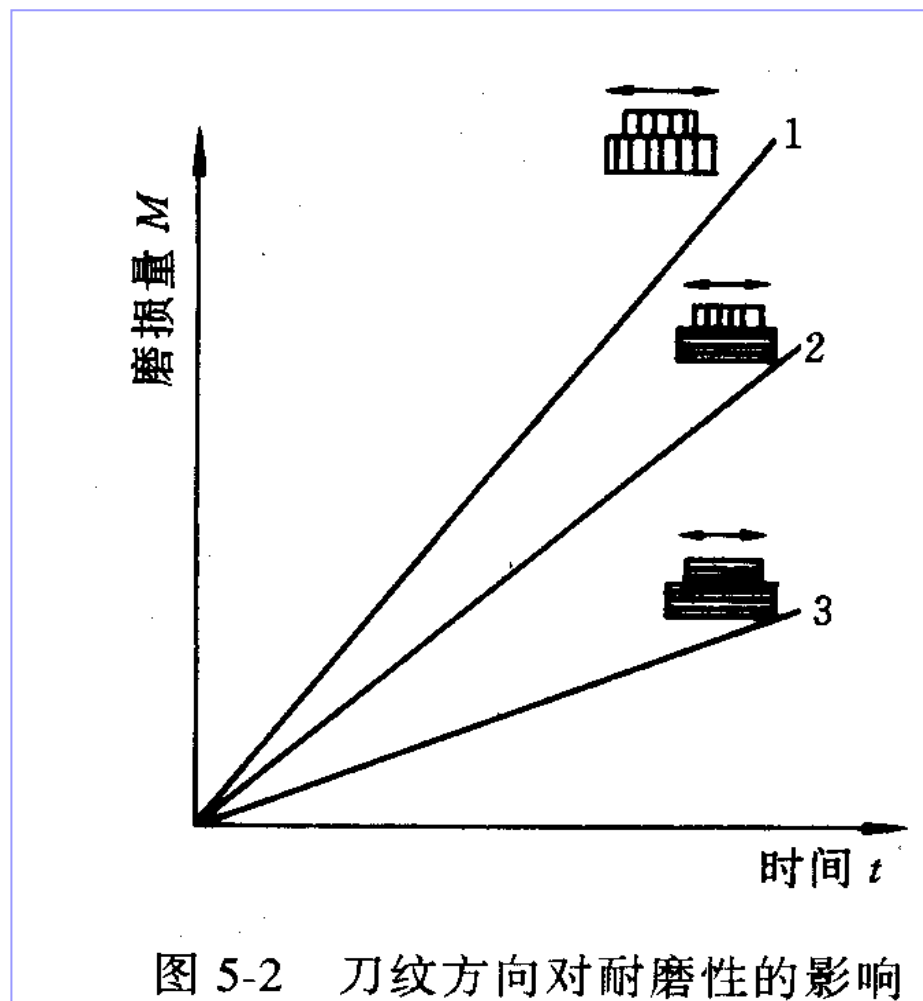


图 5-3 冷作硬化对耐磨性的影响

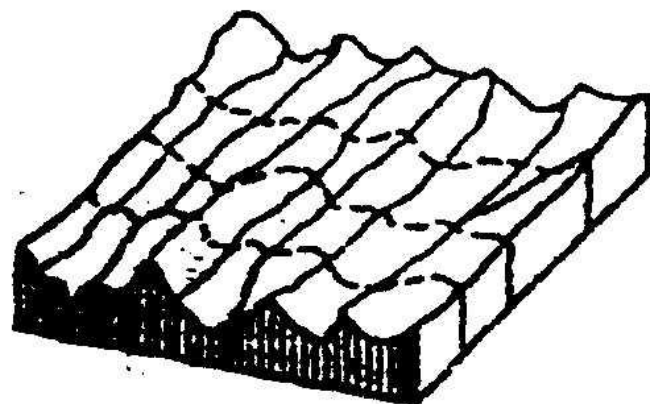
③表面纹理对耐磨性的影响



2、表面质量对零件耐腐蚀性的影响

Surface qualities influence on the anti-corrosion properties of work piece

- (1) 粗糙表面的凹谷处容易积聚腐蚀性介质而发生化学腐蚀。
- (2) 粗糙表面的凸峰容易产生电化学作用而引起电化学腐蚀。
- (3) 零件在应力状态作用时，也会产生应力腐蚀，加速腐蚀作用。



三维表面形貌

3、表面质量对疲劳强度的影响

Surface qualities influence on the fatigue strength of work piece

- (1) 表面粗糙度对疲劳强度的影响
- (2) 表面残余应力对疲劳强度的影响
- (3) 表面冷硬对疲劳强度的影响

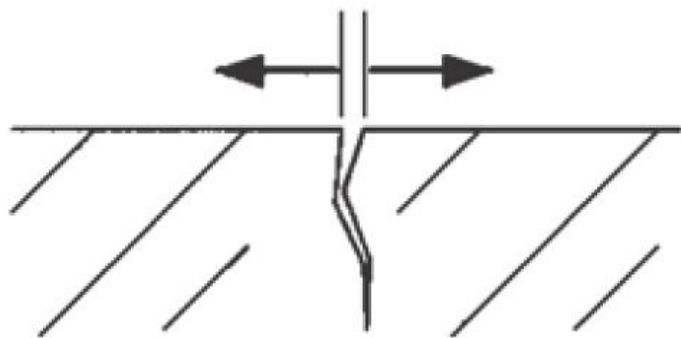


Figure 3 Crack Initiation and Growth Through Tensile Stress

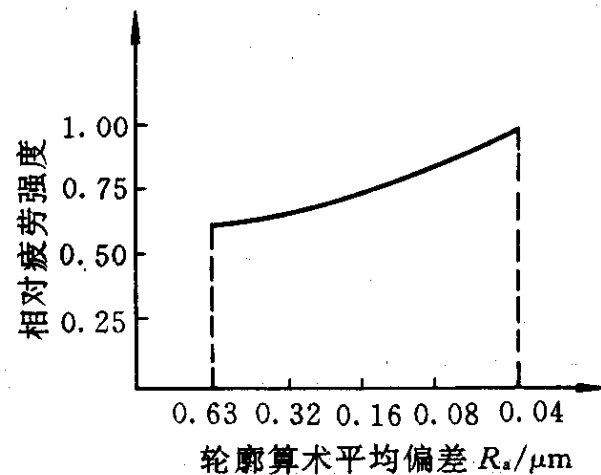
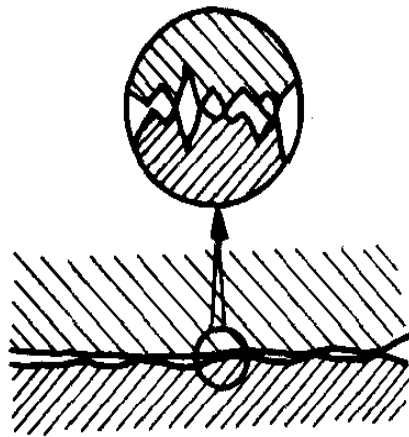


图 5-4 表面粗糙度对耐疲劳性的影响

4、表面质量对配合精度的影响

Surface qualities influence on the matching/ fitting quality of work piece

分析：粗糙度对间隙配合和过盈配合的影响



对于间隙配合，零件表面越粗糙，磨损越大，使配合间隙增大，降低配合精度。

对于过盈配合，两零件粗糙表面相配时凸峰被挤平，使有效过盈量减小，将降低过盈配合的连接强度。

第五节 影响表面质量的因素及其分析

Part 5 Factors that influence the surface quality and analyses

什么是理论粗糙度？



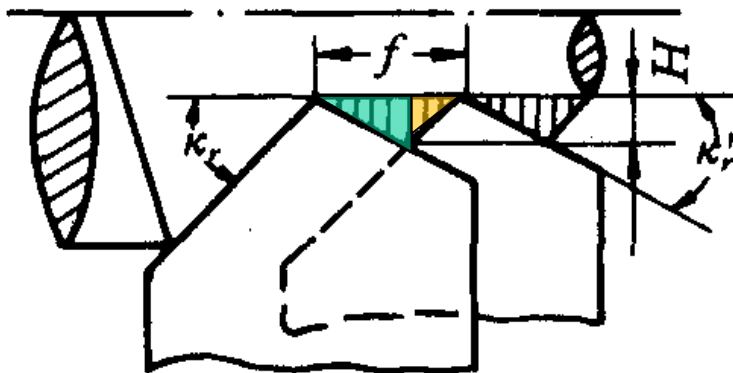
图 5-6 加工后表面的实际轮廓和理想轮廓

一、表面粗糙度影响因素及控制方法

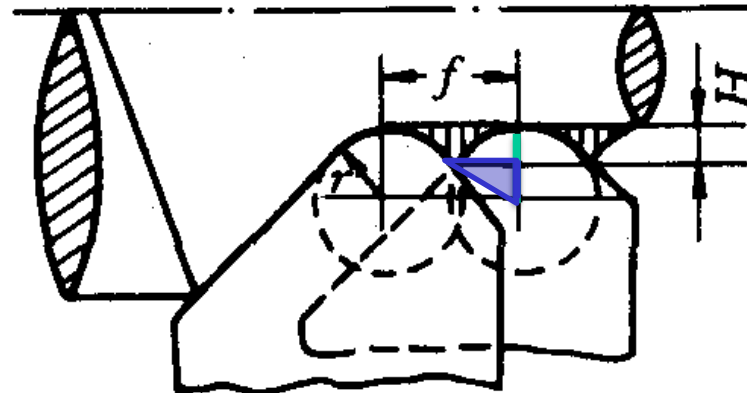
Influence factors and controlling methods of the surface roughness

1、切削加工的表面粗糙度影响因素

(1) 几何因素的影响



$$R_{\max} = \frac{f}{\operatorname{ctg} k_r + \operatorname{ctg} k_r'}$$



$$R_{\max} = \frac{f^2}{8r_e}$$

刀尖圆弧半径 r_e 、主偏角 k_r 、副偏角 k_r' 、进给量 f

推导过程：

$$R_{\max} = r_e - \sqrt{r_e^2 - \left(\frac{f}{2}\right)^2}$$

$$R_{\max}^2 + r_e^2 - 2R_{\max}r_e = r_e^2 - \frac{f^2}{4} \quad \gamma_\epsilon \gg R_{\max}$$

(2) 塑性变形的影响

① 积屑瘤的产生

塑性变形因素的影响主要表现在积屑瘤、鳞刺、表面划伤等现象的出现。

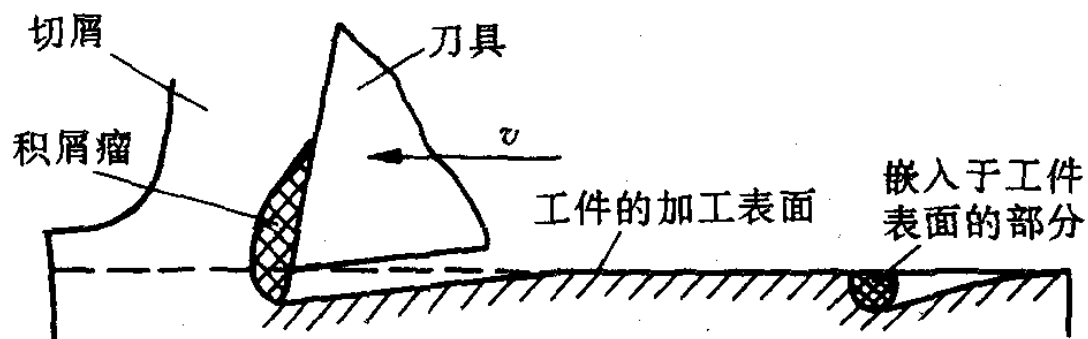
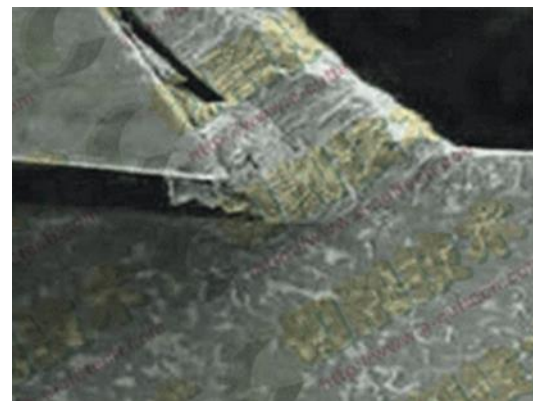
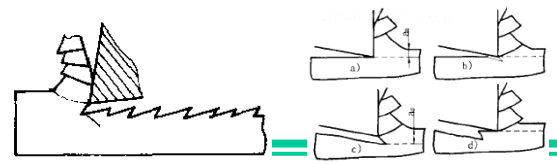


图 5-7 积屑瘤对工件表面质量的影响

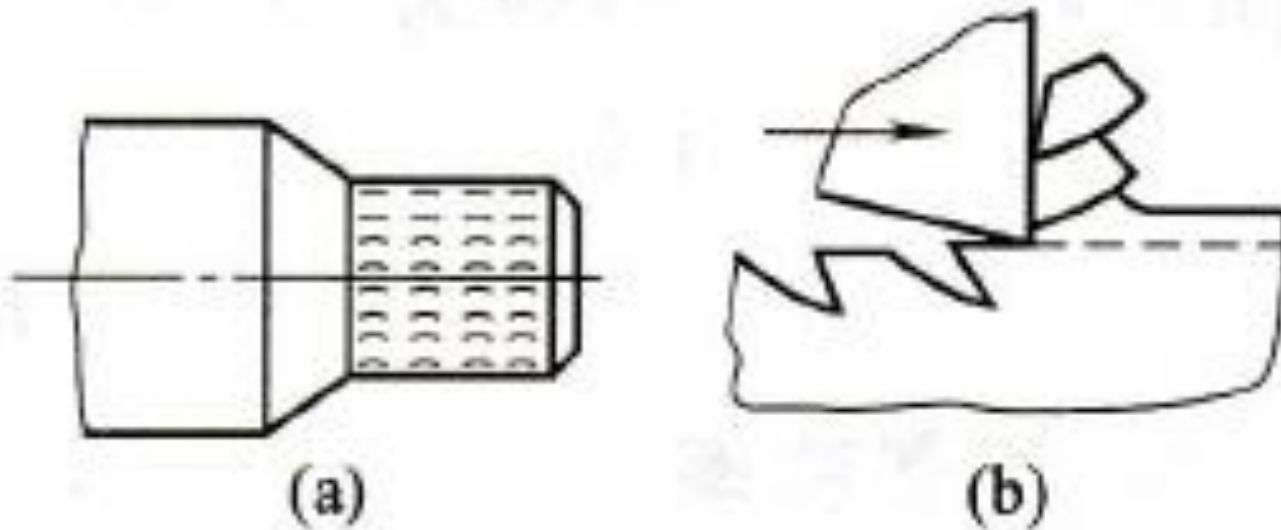


问题1： 塑性较大的材料粗糙度大，还是脆性较大的材料粗糙度大？原因是什么？

问题2： 刀具的前角、刀尖圆角、润滑液对积屑瘤产生有何影响？



② 鳞刺的产生



鳞刺是由于切屑在前刀面上摩擦和冷焊作用造成周期性地停留、代替刀具推挤切削层造成切削层相工件之间出现撕裂现象。

② 切屑拉毛或刮伤加工后表面

(3) 振动的影响（后面专门介绍）

机械加工过程中产生的振动是一种破坏正常切削过程的极其有害的现象。

当切削振动加大时，工件表面产生明显的振纹，对加工精度，刀具寿命都会带来不利的影响。

2、表面粗糙度控制方法

(1) 合理选择刀具几何参数

从几何因素来看，适量增加刀尖圆弧半径会减小加工表面粗糙度值。减小主偏角和副偏角，可减小加工表面粗糙度值。减小切削进给量有助于降低表面粗糙度。

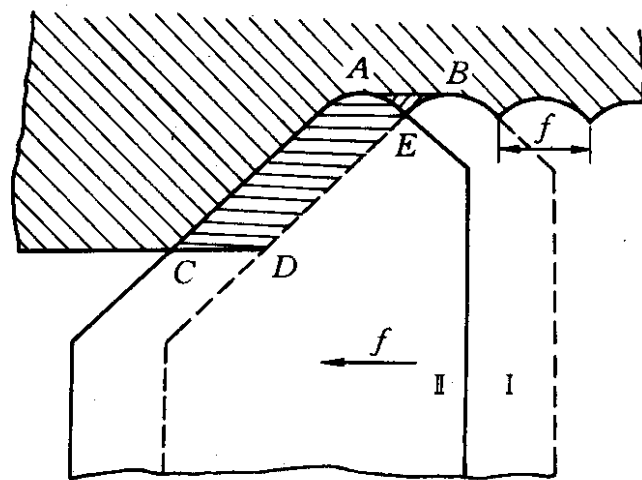
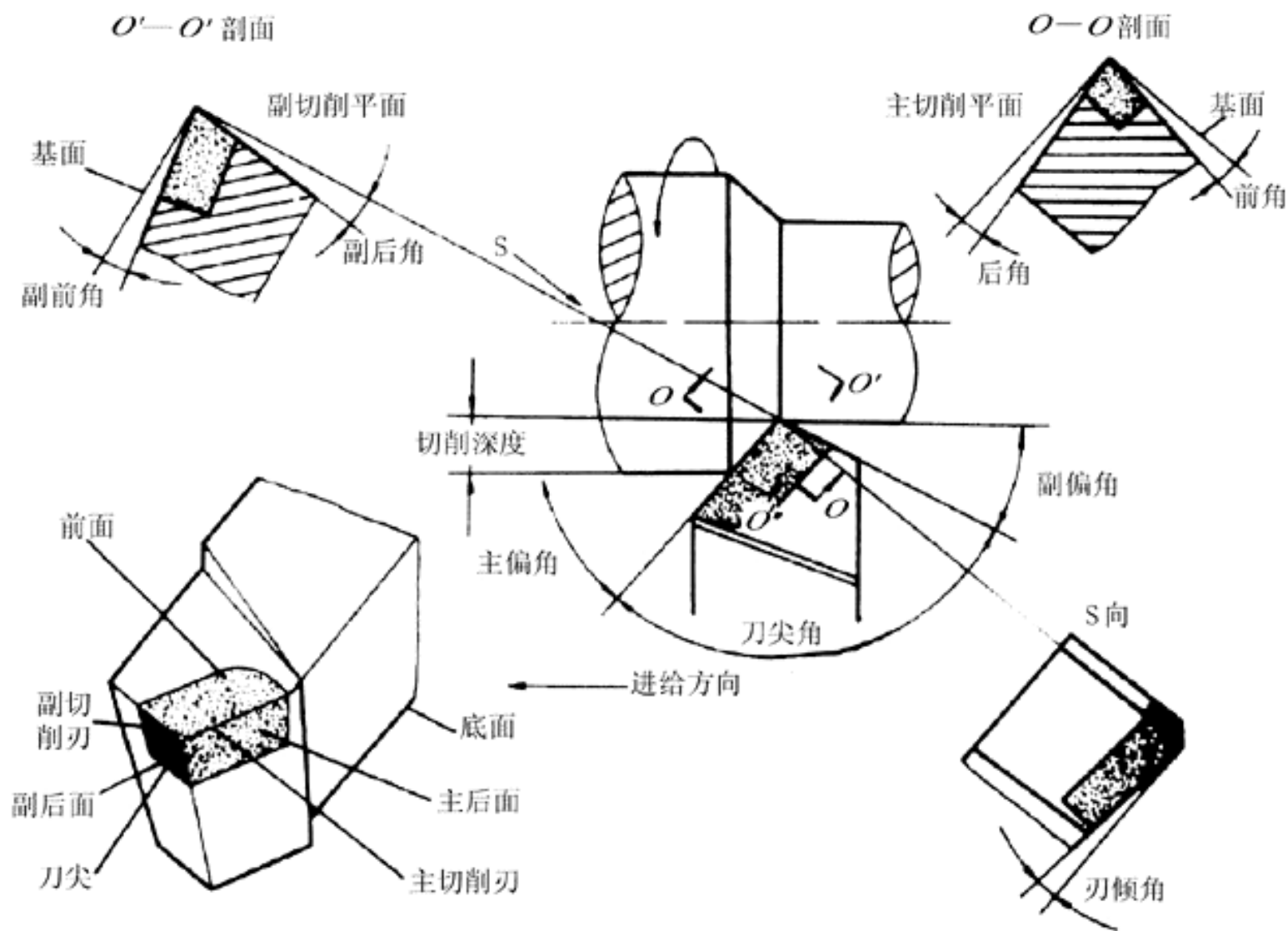


图 1-31 切削面积和残留面积

适当增大刀具的前角，有利于减小表面粗糙度值。但是前角太大，表面粗糙度值将会增加

当前角一定时，后角越大，有利于减小表面粗糙度值。但后角太大时，积屑瘤易于流到后刀面；同时，后角大容易产生切削振动，加工表面粗糙度值反而增加。



(2) 合理选择切削用量

进给量的 f 影响：当 $f > 0.15 \text{ mm/r}$ 时，对表面粗糙度影响很大；当 $f < 0.15$ 时，随着 f 的进一步减小不会引起 R_z 明显降低。

切削速度 v 的影响：

切削脆性材料（如铸铁）不容易产生积屑瘤，粗糙度与切削速度的关系较小。

切削塑性材料，切削速度对积屑瘤的产生影响很大，因此对表面粗糙度影响也很大。 v 较小时，没有积屑；当 v 提高到一定范围时，容易产生积屑，粗糙度增大； v 进一步提高，积屑减小并逐渐消失，粗糙度降低。

切削深度的影响：影响不明显。当它小于 $0.02 \sim 0.03 \text{ mm}$ 时，表面粗糙度增大。

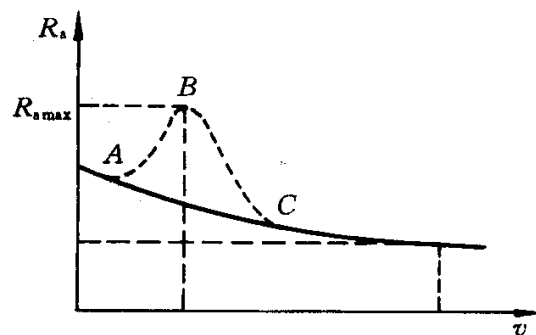
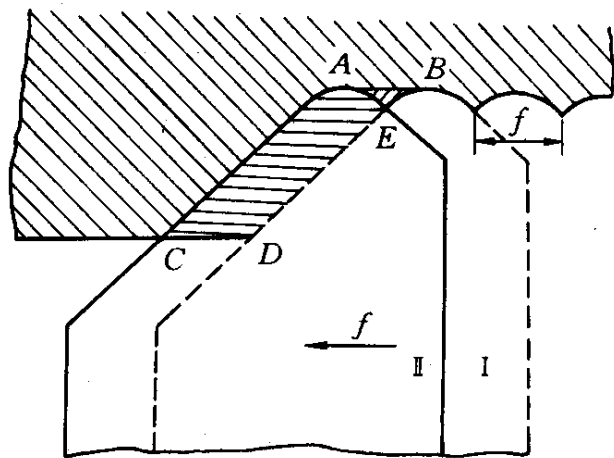
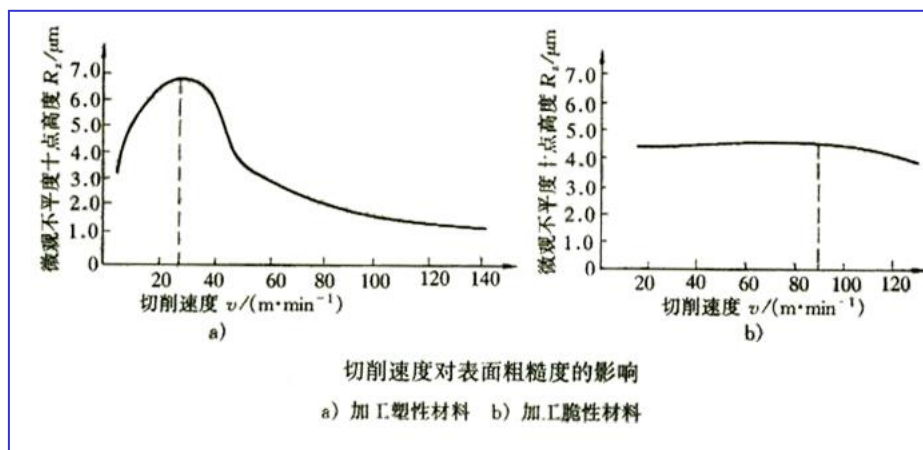


图 5-9 切削速度对表面粗糙度的影响

(3) 合理选择工件材料

① **韧性（塑性）** 大材料，加工后的表面粗糙度值也愈大。



② 相同材料，**晶粒组织**愈是粗大，加工后的表面粗糙度值也愈大。为减小加工表面粗糙度值，常在切削加工前对材料进行调质或正火处理，以获得均匀细密的晶粒组织和较高的硬度。

③刀具材料和工件材料的**匹配**：亲和度、摩擦系数、硬度、粗糙度等。

热硬性高的材料耐磨性好，易于保持刃口的锋利。

摩擦系数小的材料有利于排屑。

与被加工材料亲和力小的材料不易于产生积屑瘤和鳞刺。

因此，金刚石刀具、立方氮化硼等超硬材料刀具优于硬质合金刀具（W、Ti碳化物+Co/Mg/Ni高温高压烧结），硬质合金刀具优于高速钢刀具（含W、Cr、Mo、V等合金元素的合金工具钢），高速钢刀具优于碳素工具钢刀具（含碳量0.7%~1.2%的高碳工具钢）。

(4) 改善加工条件



冷却条件

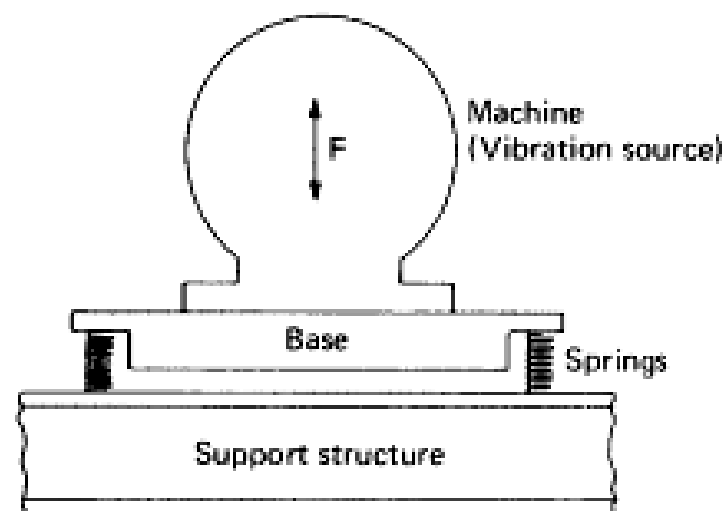
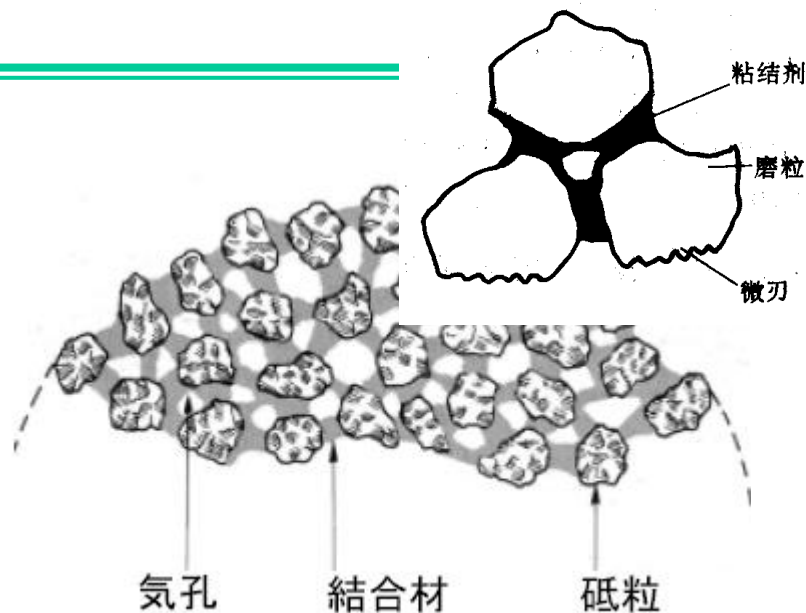


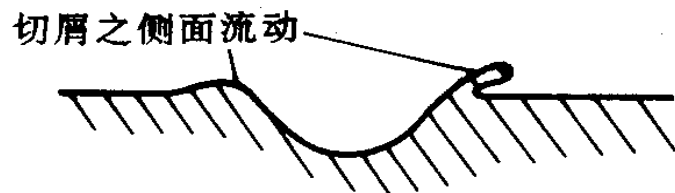
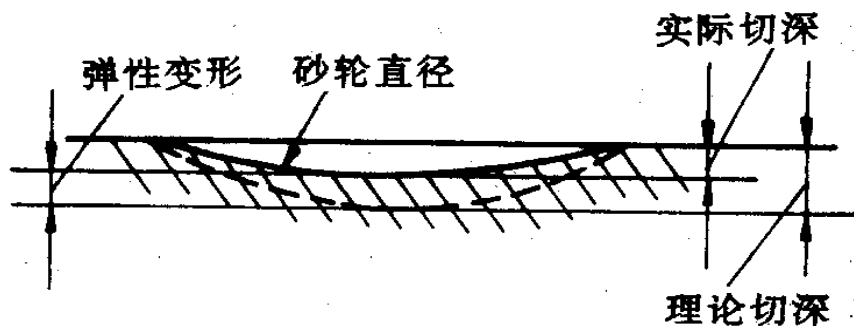
FIGURE 4.105 Conceptual sketch of isolation of vibration source.

振动条件

3、磨削加工的表面粗糙度影响因素

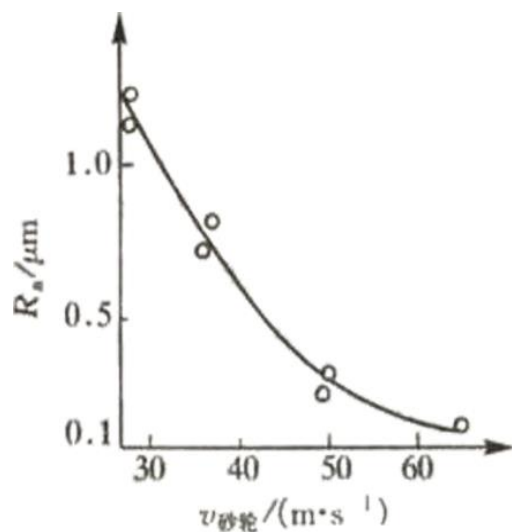
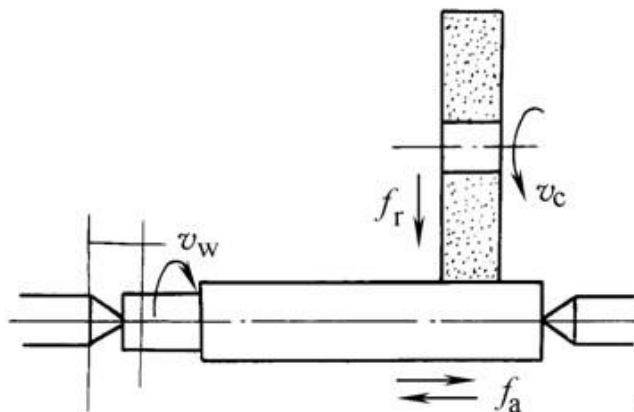


磨粒在工件表面上滑擦，耕犁和切下切屑
同时磨粒对加工表面挤压，使表面形成塑性变形

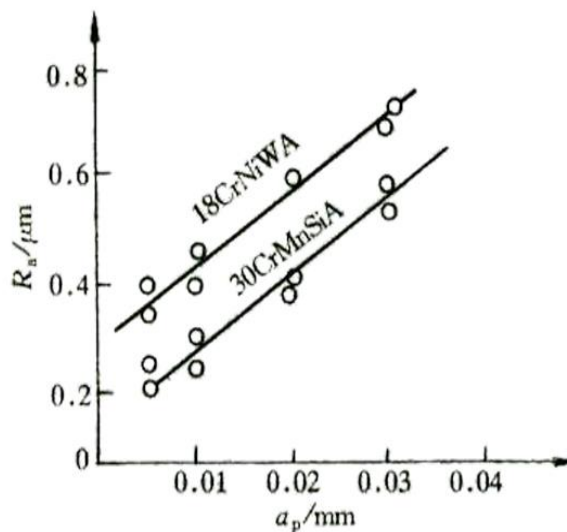


磨削表面粗糙度受到磨削用量、砂轮特性等因素影响

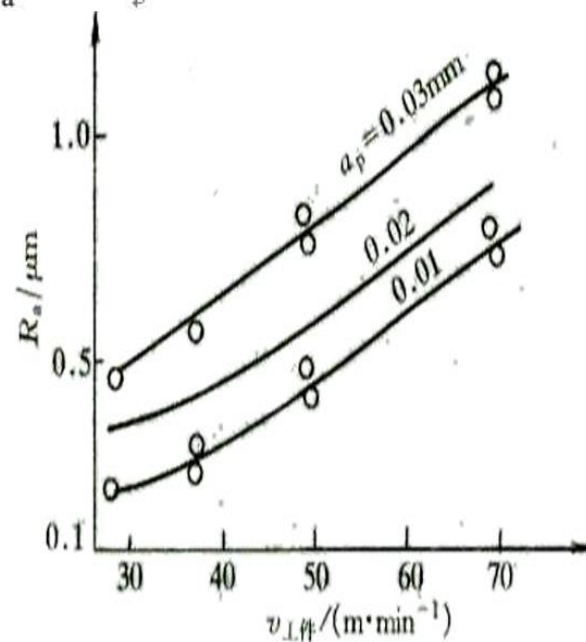
①磨削用量的影响



砂轮线速度对表面粗糙度的影响



磨削深度对表面粗糙度的影响



提高砂轮线速度

减小磨削深度

减小工件线速度

②砂轮的影响

砂轮粒度越细（粒度号大），磨削表面粗糙度值越小。

普通砂轮：8 # ~ 80 # ，

一般磨削：46 # ~ 60 # ，

精密磨削：60 # ~ 100 #



彩图 3-9 砂轮粒度对比

砂轮的硬度应适宜。

砂轮太硬——→ 加工表面粗糙度增大或烧伤加工表面；

砂轮太软——→ 磨损不均匀，加工表面粗糙度增大。

砂轮应及时修整。

去除外层已钝化或被磨屑堵塞的磨粒，以保证切削微刃的等高性和锋利性。

砂

磨料

粒
度

结合剂	
-----	--

硬度

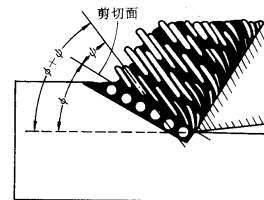
组织

二、表层物理—力学性能的影响因素及控制方法

Influence factors and controlling methods of the surface physical and mechanical properties

1、表面层的加工硬化

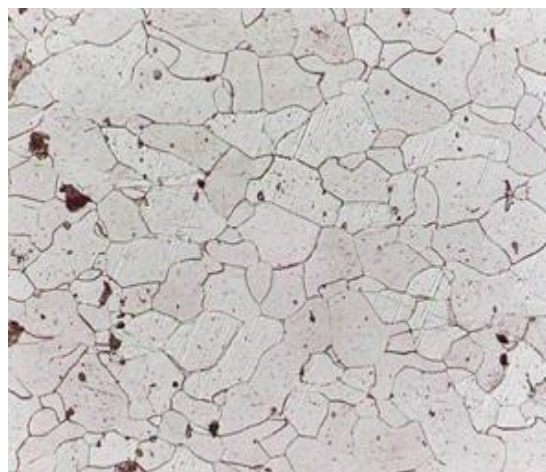
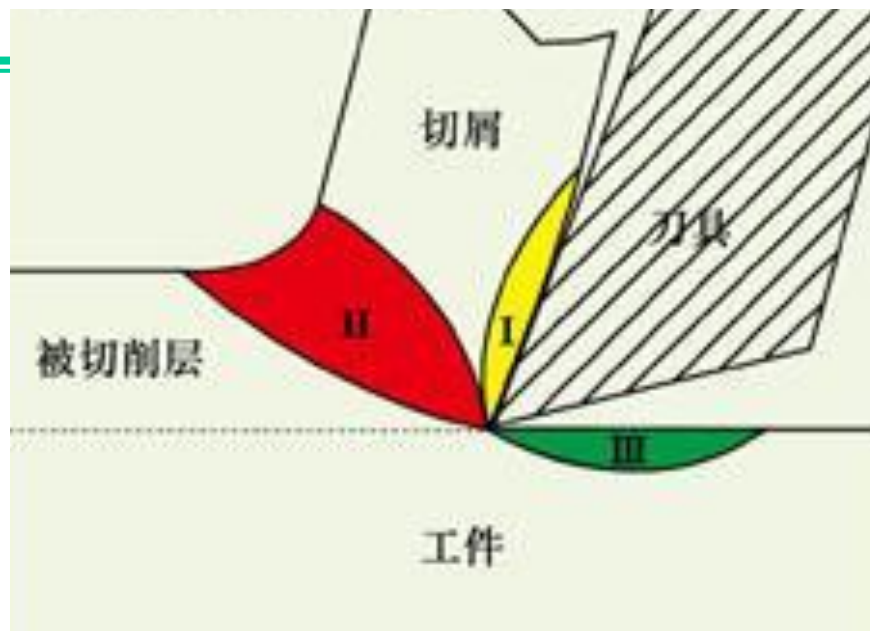
Work hardening of surface layer



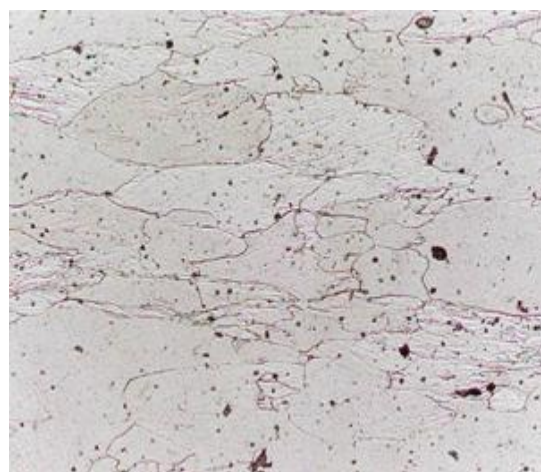
机械加工时，工件加工表面层金属受到切削力的作用，产生塑性变形，使晶体产生剪切滑移，晶格被拉长、扭曲，甚至破碎而引起材料的强化，这时它的硬度和强度都有所提高，这种现象称为**加工硬化**（也称**冷作硬化**）。

另一方面，机械加工中产生的切削热在一定条件下会使已产生硬化的金属回复到原来的状态，即**回复现象**。

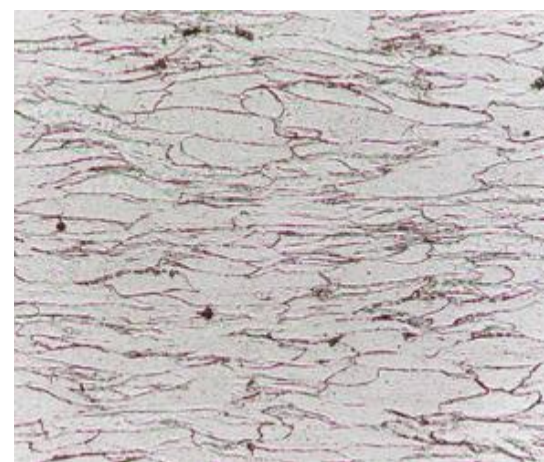
因此，表面层最后的加工硬化程度取决于硬化速度与回复速度的比率。



工业纯铁20%形变



工业纯铁40%形变



工业纯铁60%形变

(2) 刀具的影响
措施：增大前角、减小圆角半径等。

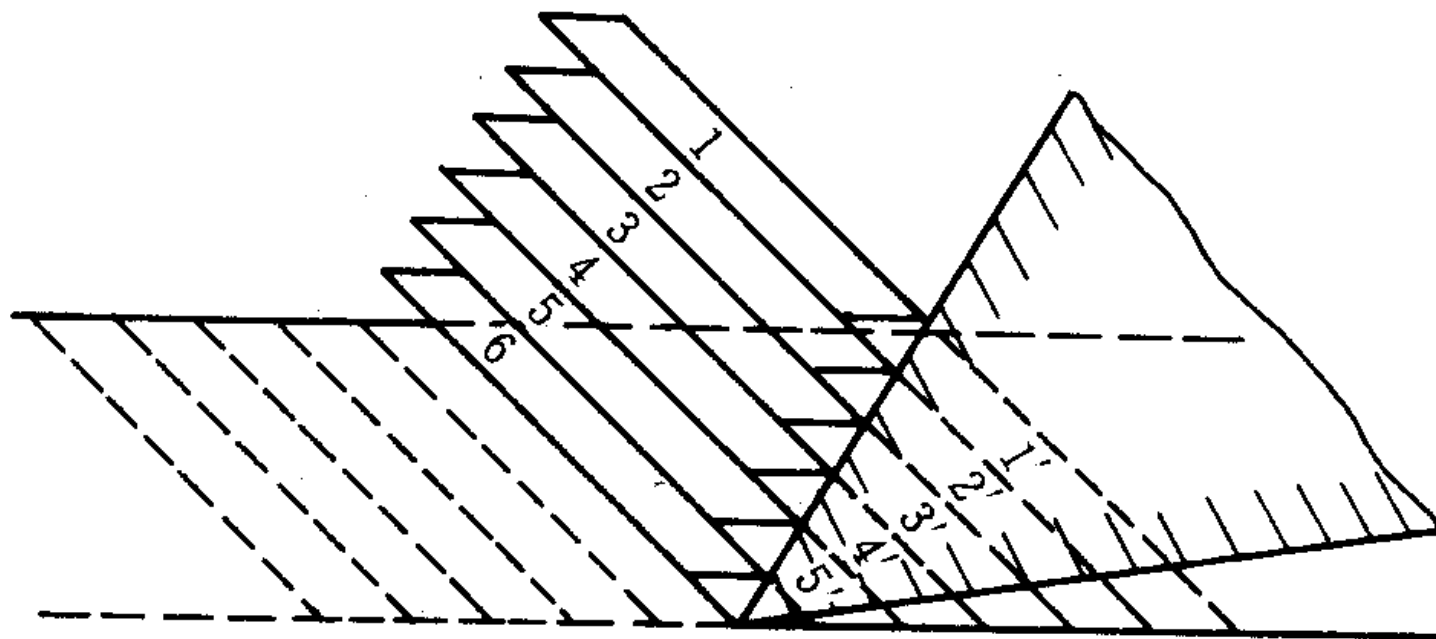


图 2-3 金属切削变形过程示意图

(3) 切削用量的影响

- ①切削力：切削力越大，则塑性变形越（ ），加工硬化越（ ）。
- ②切削温度：切削温度越高，则软化作用越（ ），硬化程度越（ ）。
- ③切削速度：当切削速度很高时，则产生的加工硬化较（ ）。

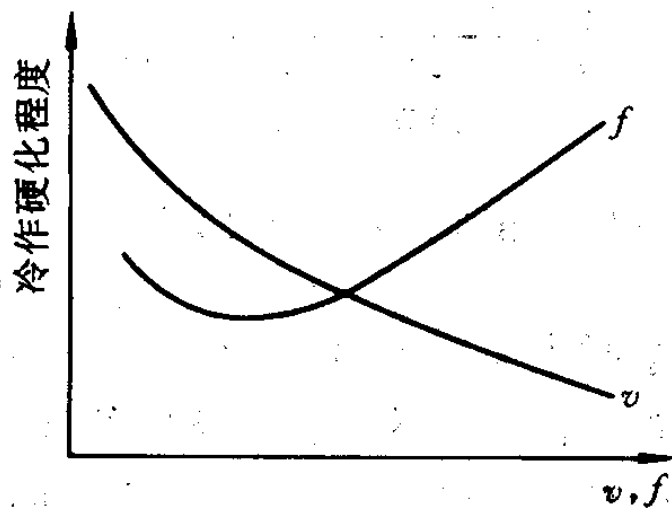


图 5-13 切削速度与进给量对冷作硬化的影响

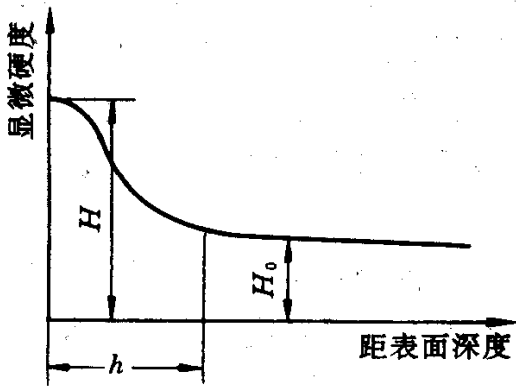
大，严重
大，低
较小

不同加工方法对比：

$$N = \frac{H_{Surface} - H_{Substrate}}{H_{Substrate}}$$

表 各种加工方法加工钢件时硬化情况

加工方法	硬化层深度 h/μm		硬化程度 N（%）	
	平均值	最大值	平均值	最大值
车削	30-50	200	20-50	100
精细车削	20-60	--	40-80	120
端铣	40-100	200	40-60	100
圆周铣	40-80	110	20-40	80
钻孔、扩孔	180-200	250	60-70	--
拉孔	20-75	--	50-100	--
滚齿、插齿	120-150	--	60-100	--
外圆磨低碳钢	30-60	--	60-100	150
外圆磨未淬硬中碳钢	30-60	--	40-60	100
外圆磨淬火钢	20-40	--	25-30	--
平面磨	16-25	--	50	--
研磨	3-7	--	12-17	--



5-12 切削加工后表面层的冷硬

2、表面晶相组织变化

Change of crystalline phase structure of surface layer

(1) 现象

机械加工→热量→加工表面出现温度升高（超过相变温度）
→金相组织变化

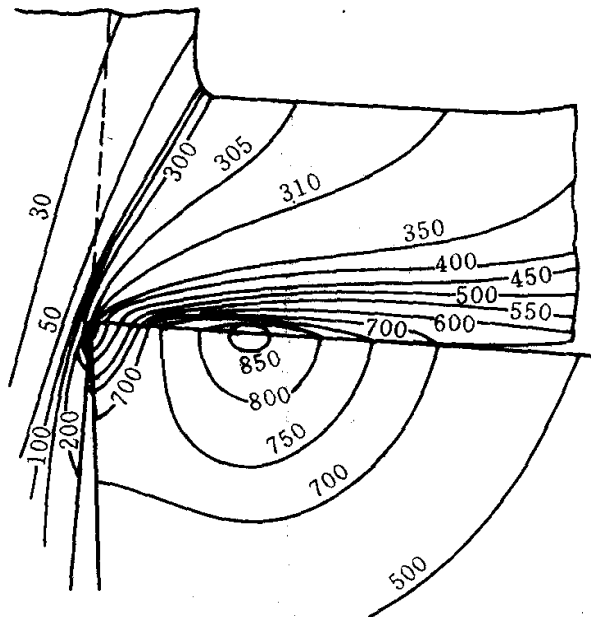


图 2-42 刀具、切屑和工件的温度分布

工件材料: GCr15; 刀具: YT4 车刀, $\gamma_o = 0^\circ$;

切削用量: $b_D = 5.8\text{mm}$, $h_D = 0.35\text{mm}$, $v_c = 80\text{m/min}$

(2) 结果之一——硬度变化

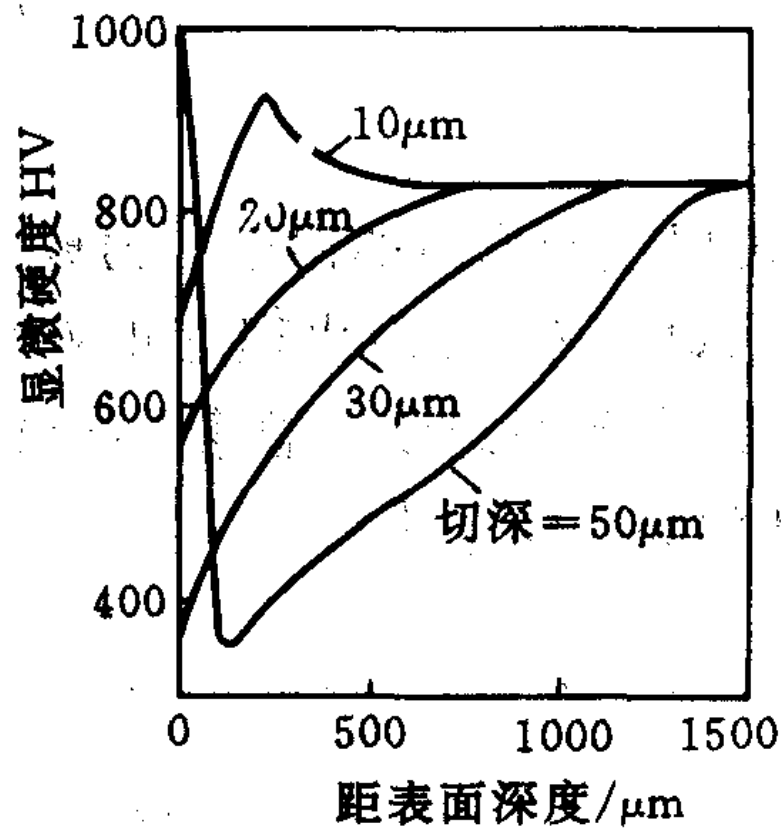


图 5-14 磨削加工表面的硬度分布

(3) 结果之二——残余应力变化

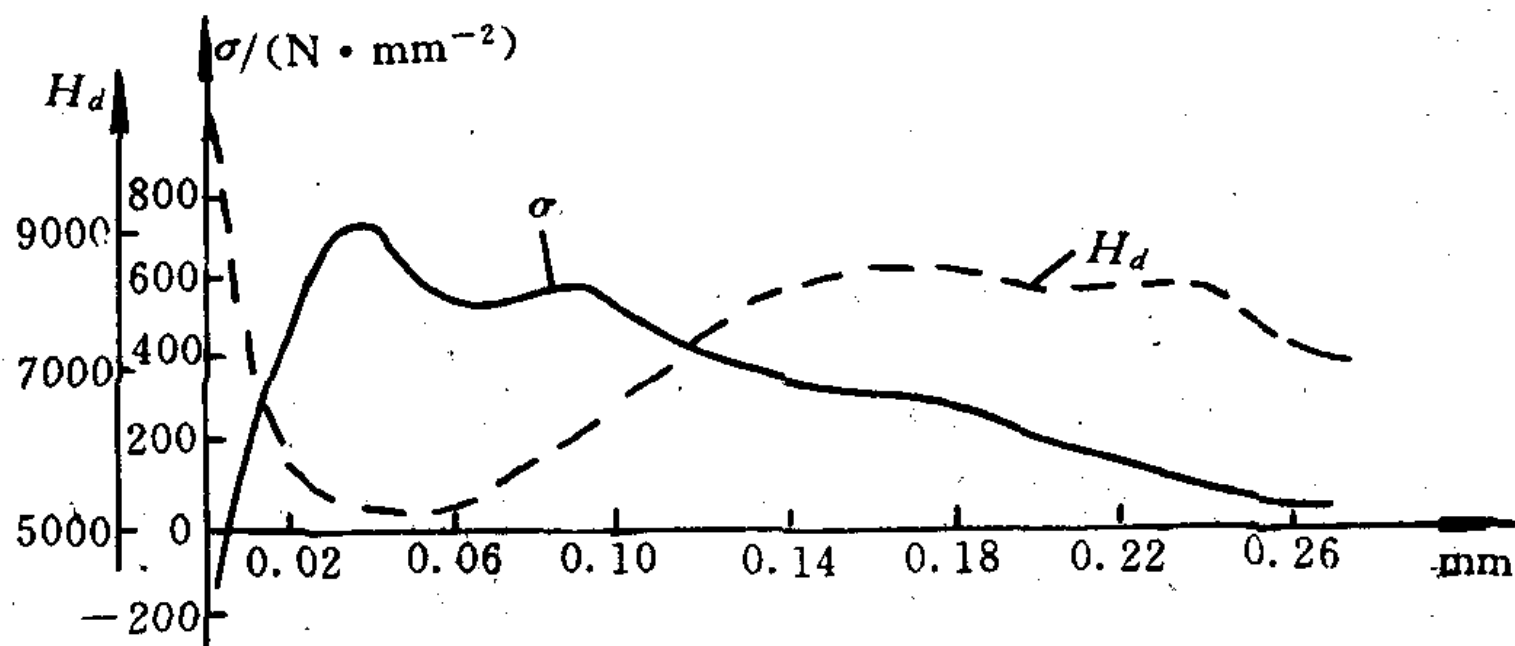


图 2-7 淬火钢 T8 磨削后表面残余应力和显微硬度变化

$v(\text{工件}) = 0.125 \text{ m/s}$; $f = 3750 \text{ mm/min}$; $a_p = 0.05 \text{ mm}$

(4) 结果之三——材料烧伤

(1) 淬火烧伤 表层→二次淬火马氏体

(2) 回火烧伤 表层马氏体→回火屈氏体或索氏体

(3) 退火烧伤 表层会被退火

影响磨削烧伤的因素有磨削用量、工件材料、砂轮性能及冷却条件等。

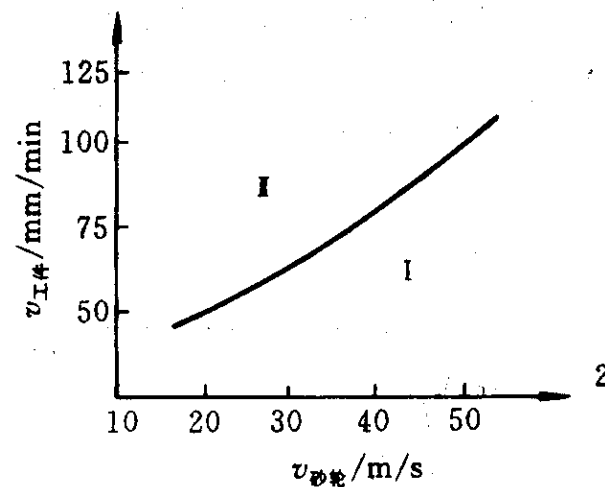


图 5-20 工件和砂轮速度的无烧伤
临界比值曲线

磨削淬火钢时产生的三种烧伤

(1) 回火烧伤

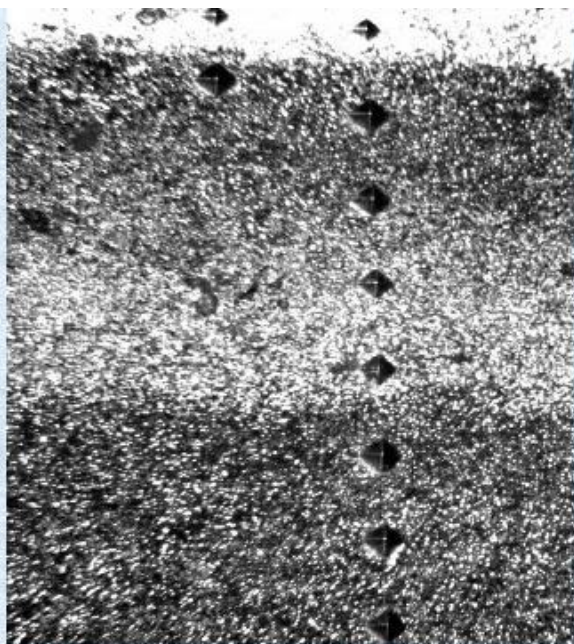
如果磨削区超过马氏体转变温度而未超过相变临界温度（碳钢的相变温度为 723°C ），这时工件表层金属的金相组织，由原来的马氏体转变为硬度较低的回火组织（索氏体或托氏体），这种烧伤称为回火烧伤。

(2) 淬火烧伤

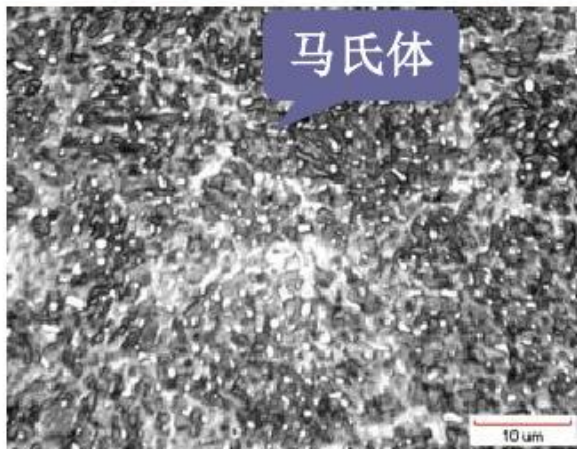
如果磨削区温度超过了相变温度，马氏体发生相变转为奥氏体。在切削液急冷作用下，使表层金属发生二次淬火，硬度高于原来的回火马氏体，里层金属则由于冷却速度慢，出现了硬度比原先的回火马氏体低的回火索氏体和托氏体，这种烧伤称为淬火烧伤。由于二次淬火层极薄，所以表面总的硬度是降低的。

(3) 退火烧伤

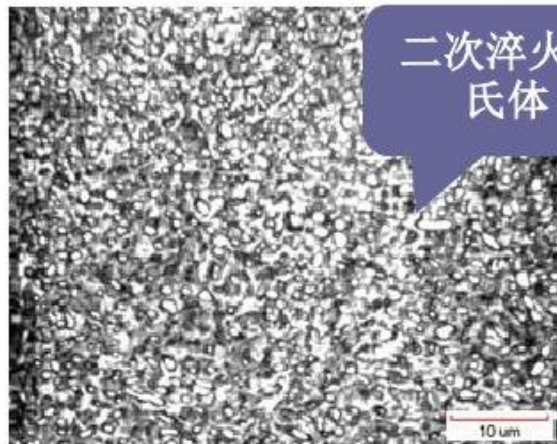
工件表层温度超过相变温度，马氏体发生相变转变为奥氏体。而磨削区又没有冷却液进入，表层金属产生退火组织，硬度急剧下降，称之为退火烧伤。



工件基体的金相组织

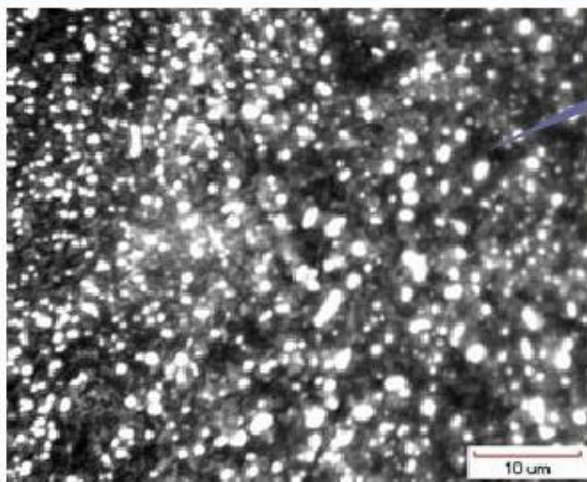


马氏体



二次淬火马氏体

磨削白层的金相组织



暗层的金相组织

索氏体

暗层组织由回火屈氏体、回火马氏体组成，其中靠近白层处为回火屈氏体并含少量的黑色团状索氏体

控制磨削烧伤的途径

(1) 磨削用量

- | | | |
|------------|-------|--------|
| 1. 砂轮速度增大 | ————→ | 磨削烧伤增大 |
| 2. 径向进给量增大 | ————→ | 磨削烧伤增大 |
| 3. 工件速度增大 | ————→ | 磨削烧伤减小 |

减轻磨削烧伤措施

- 适当减小切深
- 增大工件速度
- 降低砂轮转速
- 但工件速度过大会导致粗糙度值变大，而砂轮速度低会影响加工效率，因此应综合考虑

(2) 砂轮

(1) 砂轮的组成

一般采用立方碳化硼砂粒和弹性粘结剂组成的砂轮，其和铁族元素化学反应倾向小，磨削温度低，不易产生磨削烧伤。

(2) 砂轮的硬度

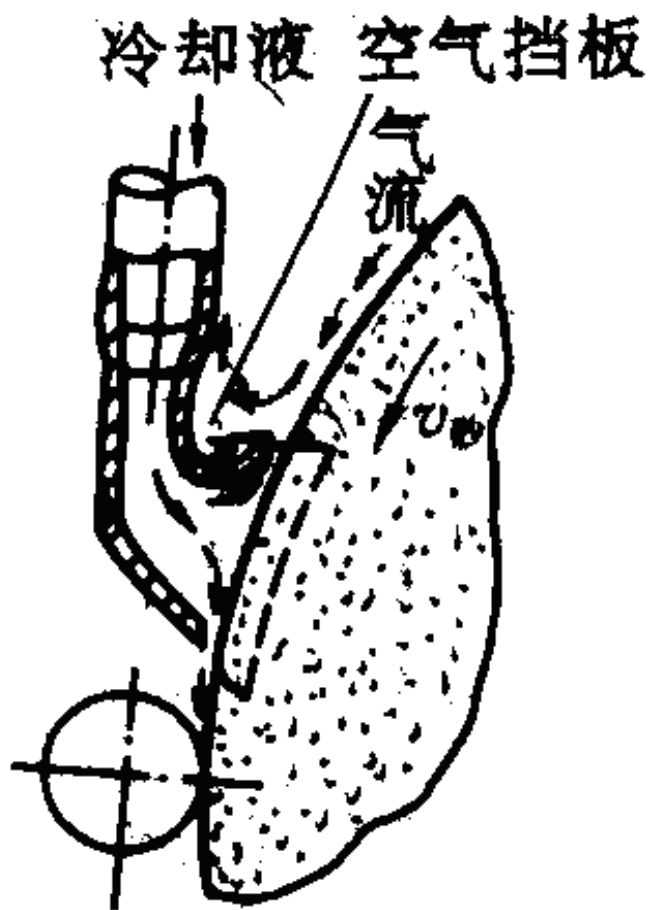
砂轮太硬，磨粒钝化后不易脱落，自锐性不好，易产生烧伤，所以用软砂轮较好。

(3) 工件材料

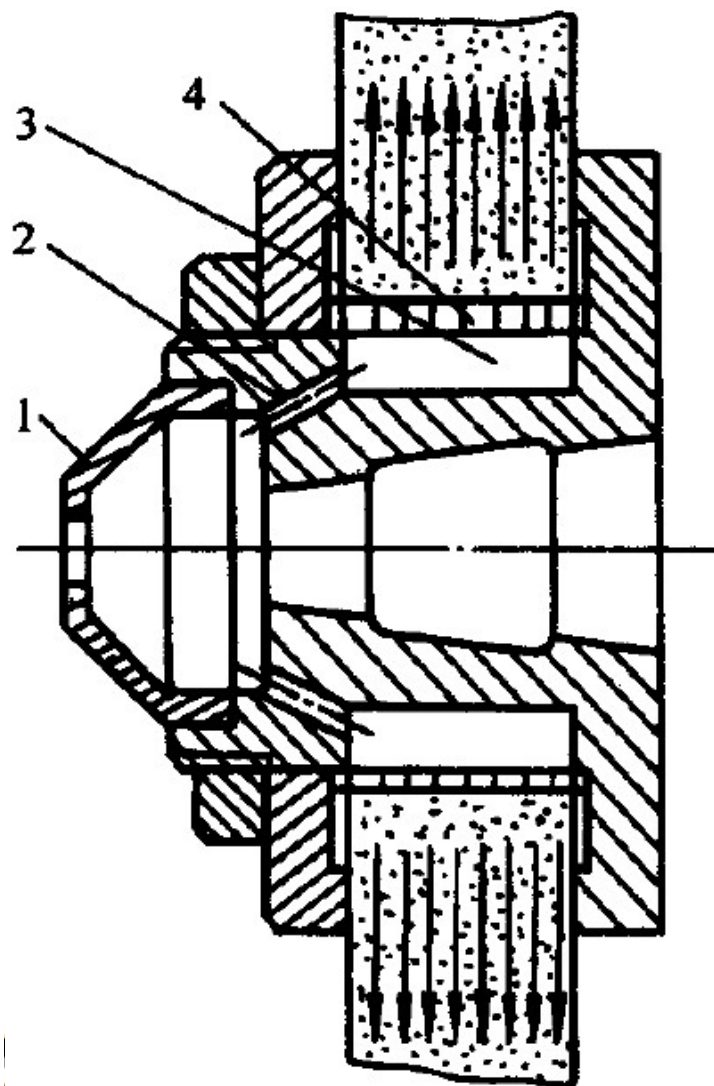
硬度高、强度高、韧性大、导热性差的材料都会使磨削区温度升高，易产生磨削烧伤。

(4) 冷却方法

采用切削液冷却。采用内冷却砂轮、浸油砂轮，采用高压大流量切削液并安装空气挡板的切削液喷嘴等强化冷却效果。



带空气挡板的冷却喷嘴



内冷却装置

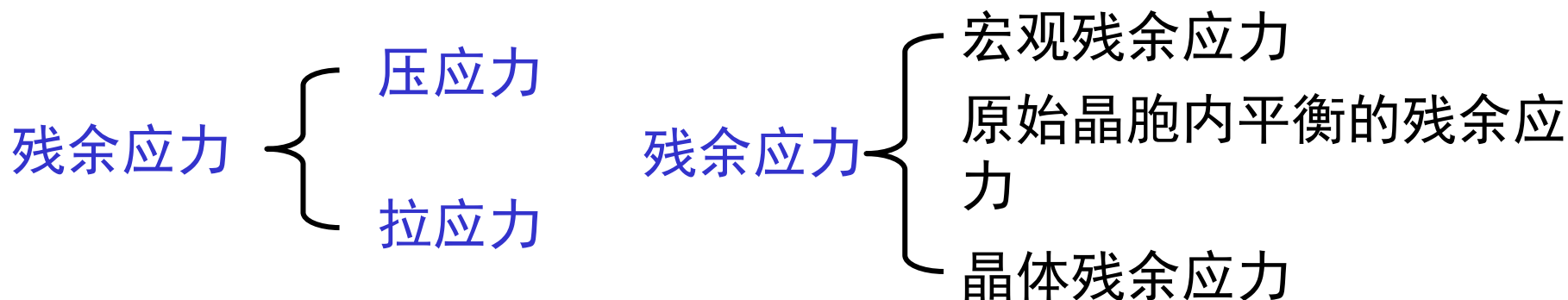
- 1—锥形盖 2—通道孔 3—砂轮中心孔
4—有径向小孔的薄壁套

三、表面层的残余应力

Residual stress of surface layer

1、什么叫表面残余应力

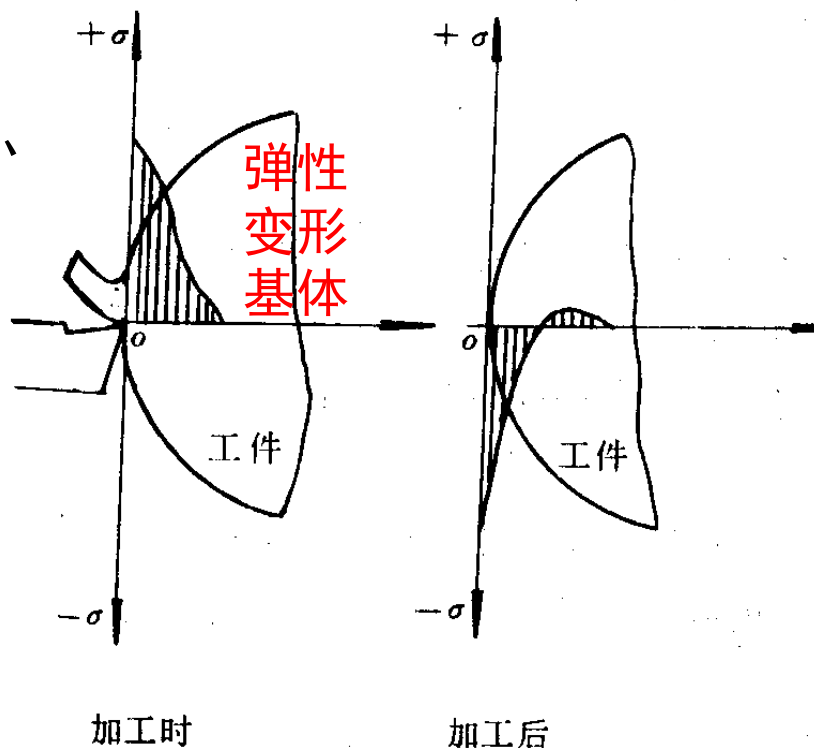
切削和磨削加工中，加工表面层材料组织相对基体组织发生形状、体积变化或金相组织变化时，在加工后工件表面层及其与基体材料交界处就会产生相互平衡的应力，即表面层残余应力。



2、加工表面产生残余应力的原因

(1) 冷态塑性变形引起的表面残余应力

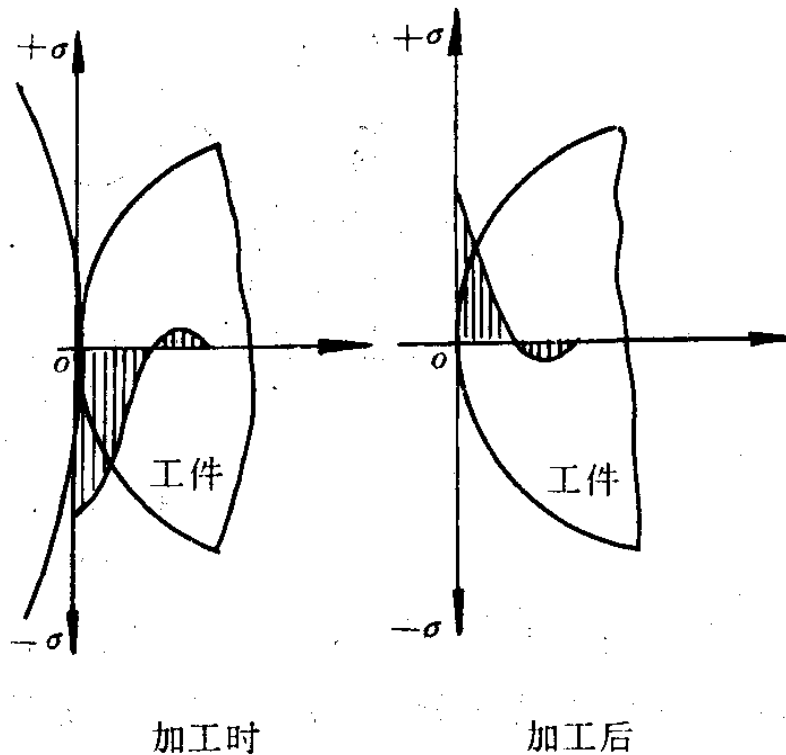
切削加工时，表面受到刀具挤压、摩擦，表面层产生伸长塑性变形



加工后，基体趋于弹性恢复，但受到已产生塑性变形的表面层金属牵制

(2) 热态塑性变形引起的表面残余应力

磨削加工时，表面在磨削热作用要产生膨胀，但是基体温度较低，阻碍其膨胀，表面产生热压应力



加工后，表面温度下降出现收缩倾向，受到里层材料牵制

(3) 金相组织变化引起的表面残余应力

金相组织的变化产生材料密度的变化，必然导致内应力的产生。

- 当表面层金属体积膨胀时，表层金属产生残余压应力，里层金属产生残余拉应力；
- 当表面金属体积缩小时，表层金属产生残余拉应力，里层金属产生残余压应力。

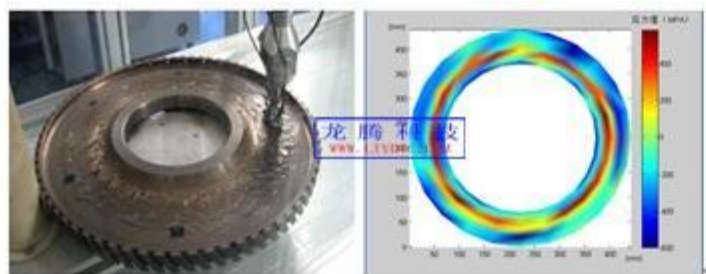


图3 齿轮齿根残余应力超声无损检测现场

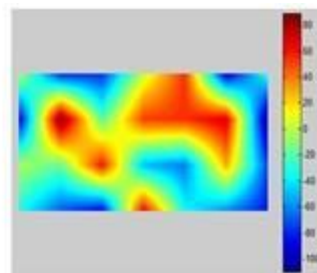
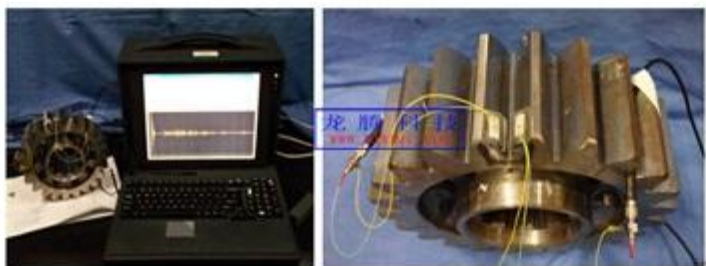


图1 N2310EM 型轴承内滚道残余应力分布

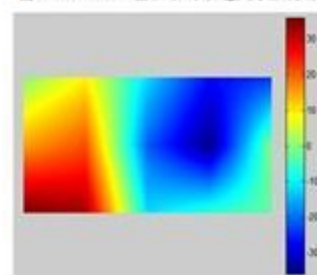


图2 32610H 型轴承外滚道残余应力分布

超声波残余应力检测仪

3、减小残余拉应力措施

- (1) 提高冷却效果
- (2) 改善砂轮的磨削性能
- (3) 选择合适的加工用量

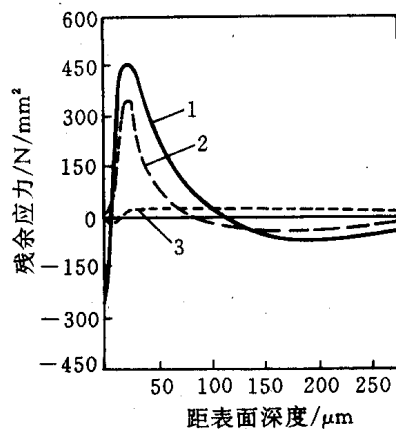


图 5-18 磨削切深对残余应力的影响

曲线 1——切深 0.05mm/行程； 曲线 2——切深 0.025mm/行程； 曲线 3——低残余应力

①采用小的切深

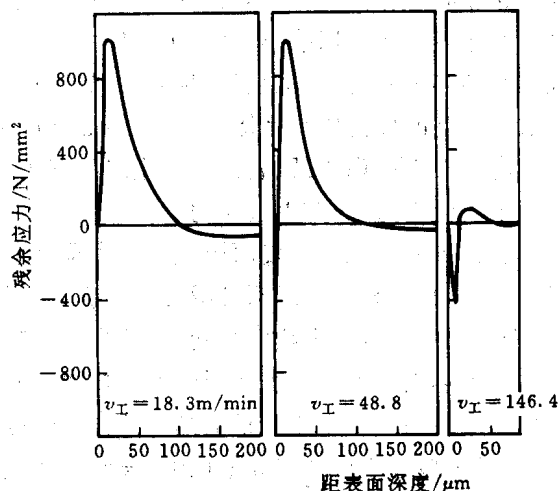


图 5-17 工件速度对残余应力的影响

②提高工件速度

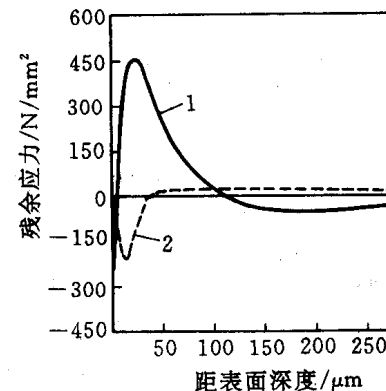


图 5-19 砂轮速度对残余应力的影响

曲线 1—— $v = 30\text{m/s}$ ； 曲线 2—— $v = 10\text{m/s}$

③降低砂轮速度，
但影响加工效率

第六节 机械加工振动及抑制振动的途径

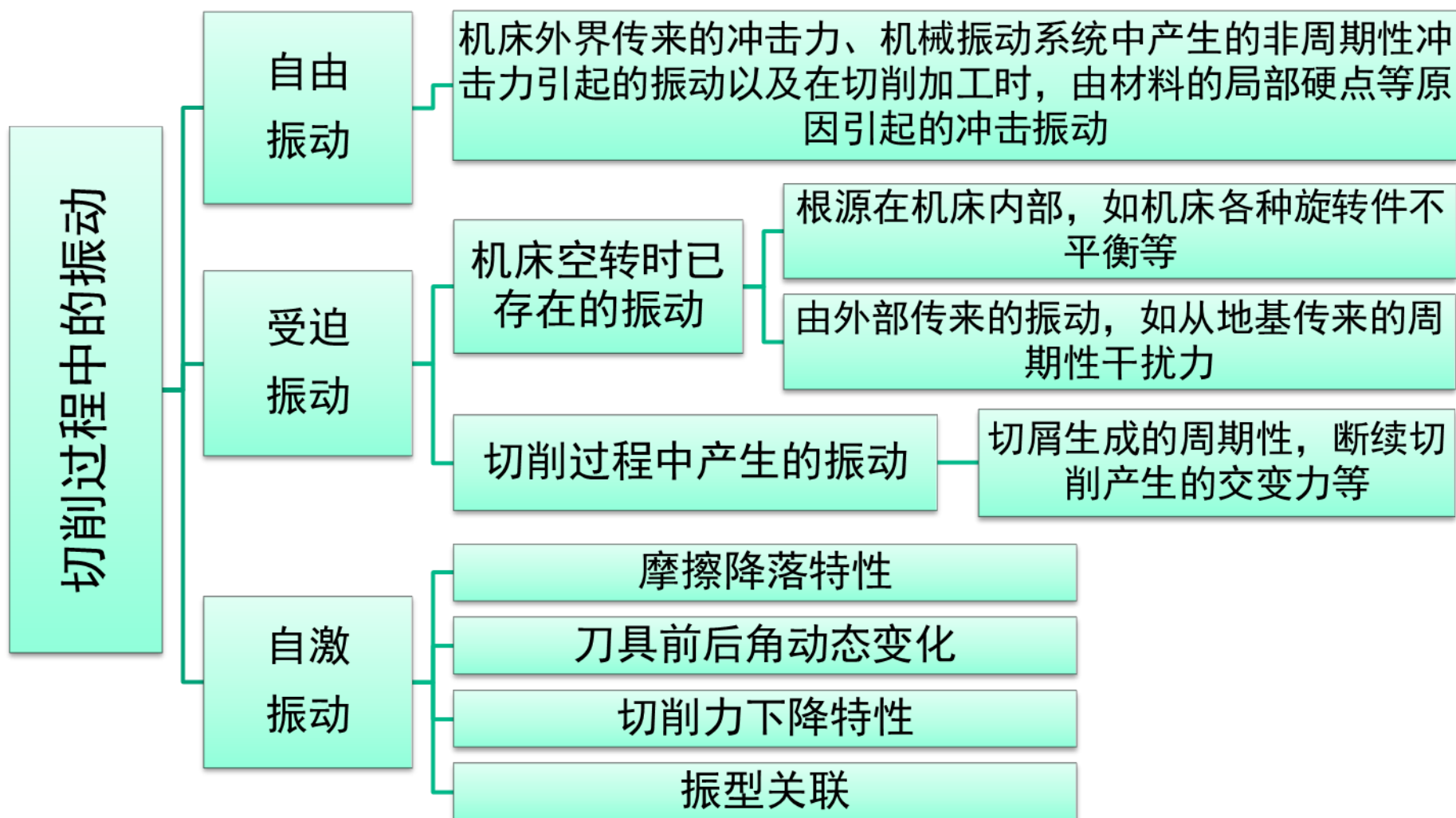
Part 6 The vibration during mechanical manufacturing and its suppression

机械加工中的振动对于加工质量和生产效率有很大影响，通常来讲是十分有害的。

随着机械加工研究深入，对切削机理得到这样的观点：即在切削过程中，切屑不是根据刀尖与工件间的静力学关系形成，而是由连续地产生与一次冲击破坏机理相类似的动力学关系而形成的。

因此，发展了利用振动来更好地切削，如振动磨削、振动研抛、超声波加工等，都是利用振动来提高表面质量或生产率。

机械加工过程中产生的振动，按其性质可以分为：



自由振动

Free vibration

(1) 由偶然的干扰力引起，靠系统弹性恢复力维持的振动，会逐渐衰减，因此对机械加工影响不大。

Concept of Free vibration : When a structure vibrates without any externally applied forces, such as when it is pulled out of position, and then released.

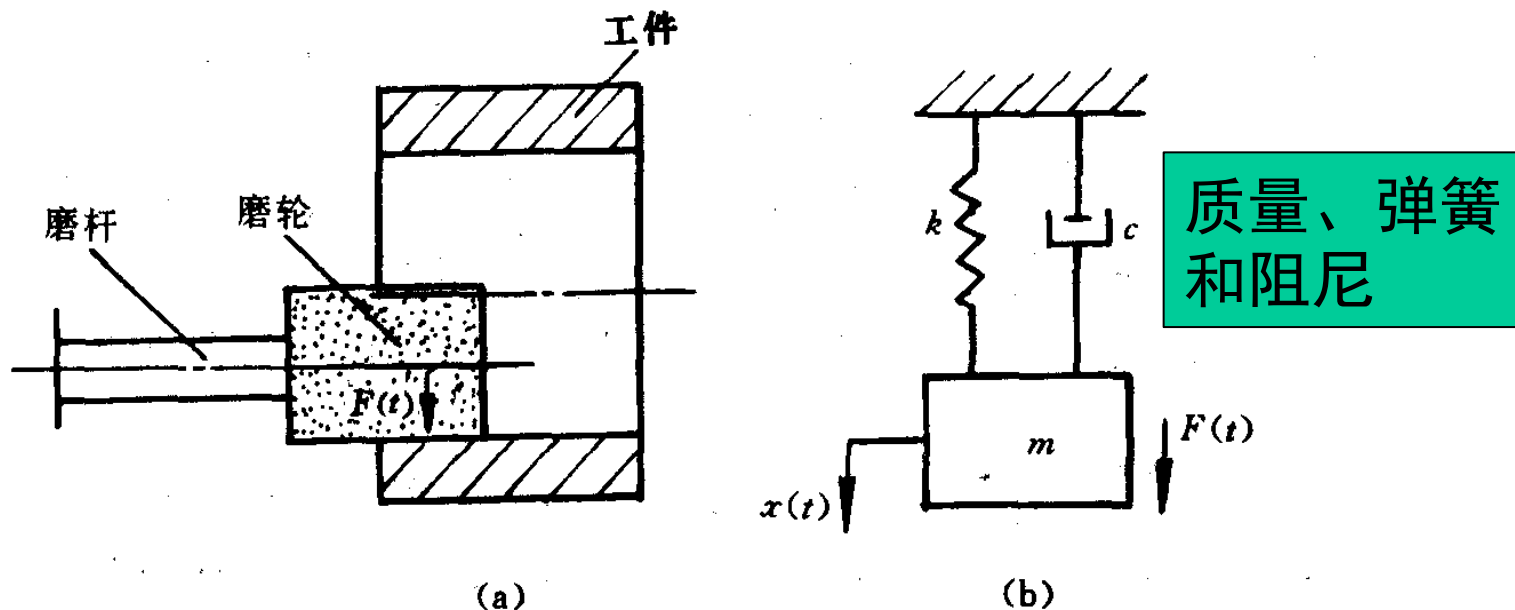


图 2-15 内圆磨削系统及其力学模型

(a) 内圆磨削示意图； (b) 简化力学模型

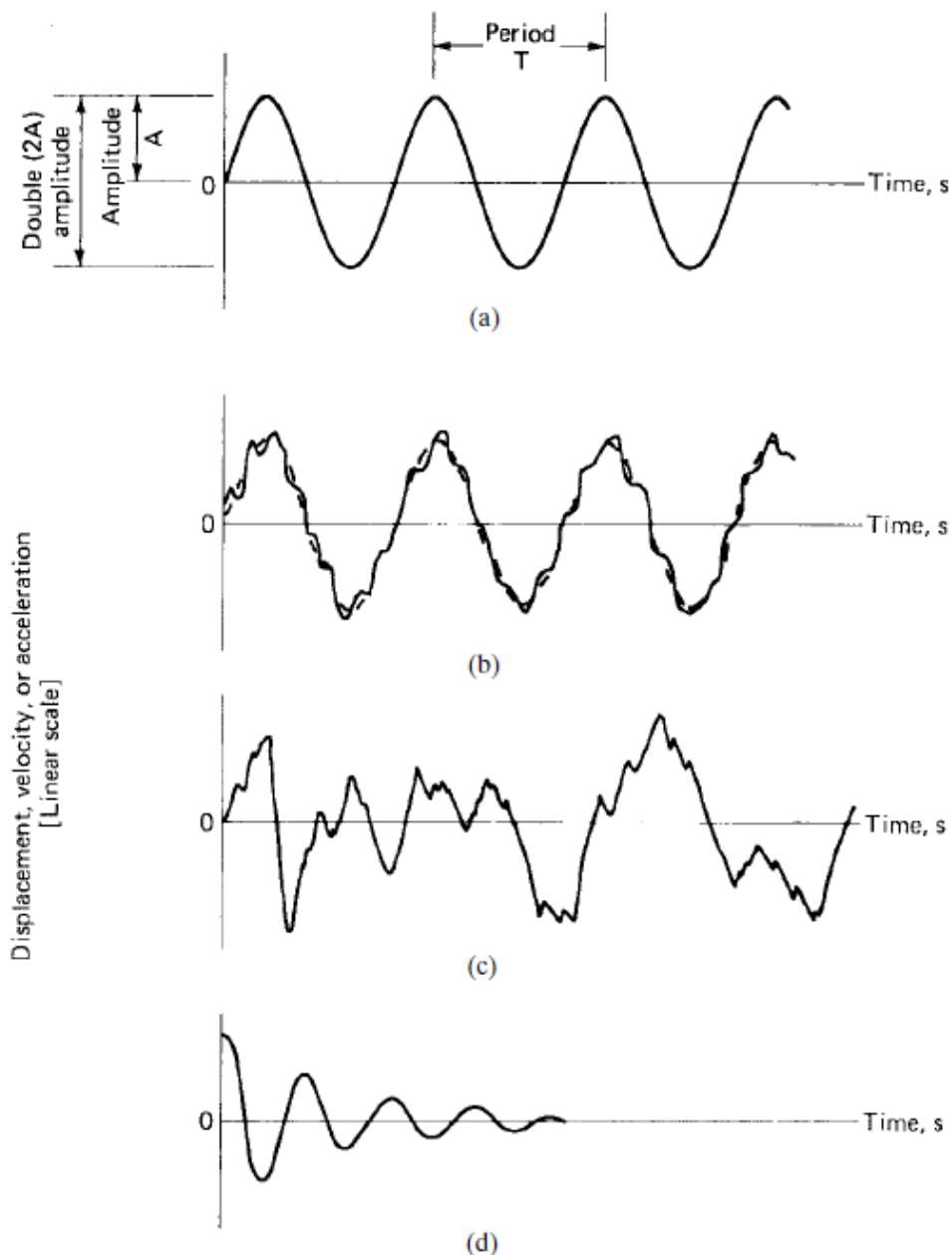
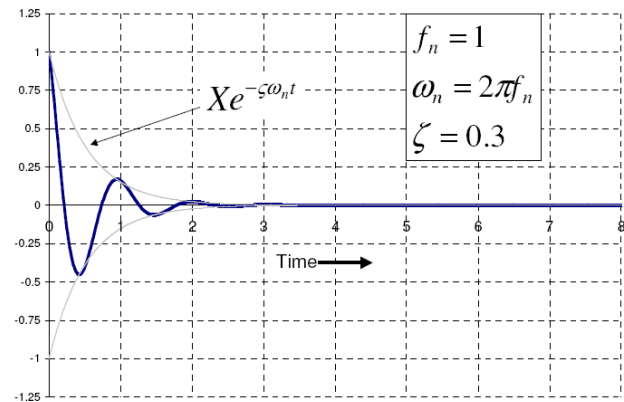
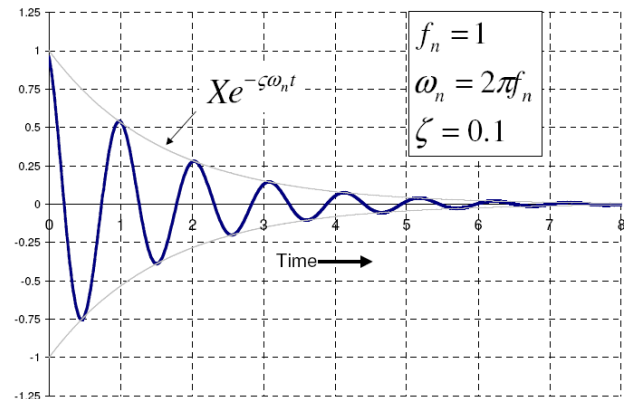
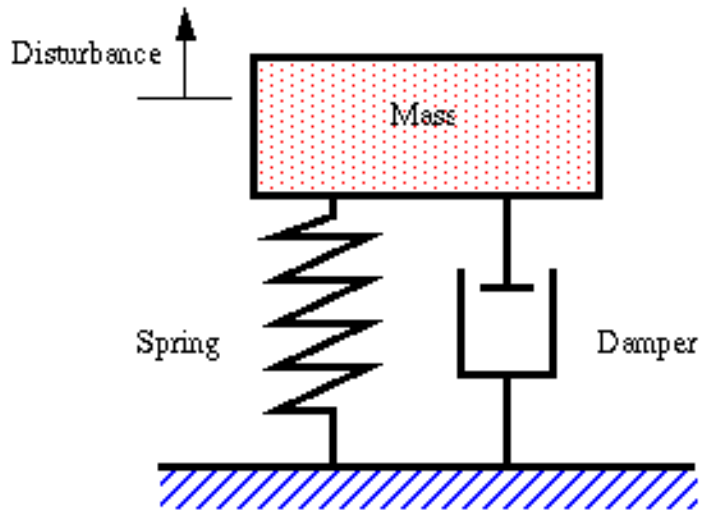


FIGURE 4.103 Typical vibration records: (a) steady sinusoidal or simple harmonic vibration; (b) steady multifrequency vibration; (c) irregular (nonperiodic) vibration; (d) decaying transient single-frequency vibration.

What is Damping (阻尼)



一、机械加工中的受迫振动

Forced vibration

受迫振动概念: 受迫振动（又称强迫振动）是由外界周期性干扰力作用而引起的振动。

Forced vibration: When a structure vibrates under the influence of an external force.



1、受迫振动特点

(1) 受迫振动是由周期性激振力引起的，不会被阻尼衰减掉，振动本身也不能使激振力变化。

(2) 在振动过程中，系统振动频率和激振力频率相同或者是它的倍数，易于识别与解决。

(3) 受迫振动的幅值和干扰力幅值和频率，以及系统的刚度和阻尼有关。它在很大程度上取决于干扰力频率与系统固有频率的比值 ($\lambda = \omega / \omega_0$)，当干扰力频率接近系统固有频率时 ($0.7 \leq \lambda \leq 1.3$)，会产生共振现象，导致受迫振动的幅值大幅度升高。

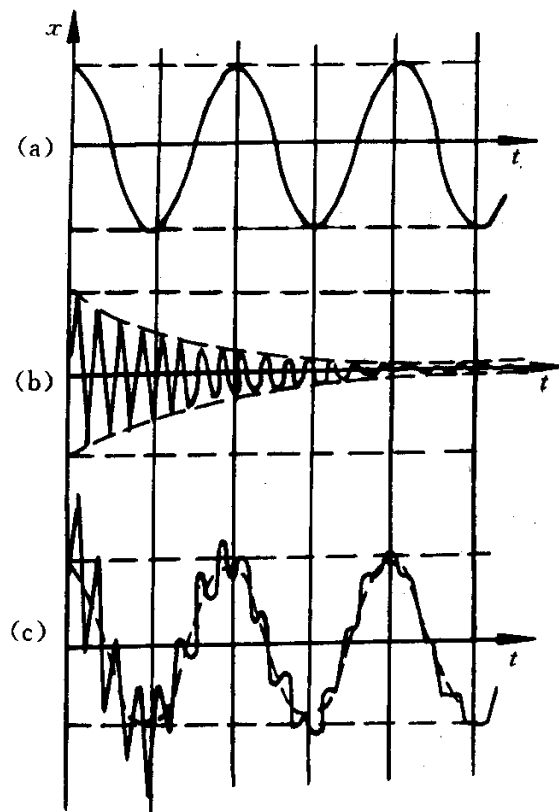


图 2-16 受迫振动的初时响应过程

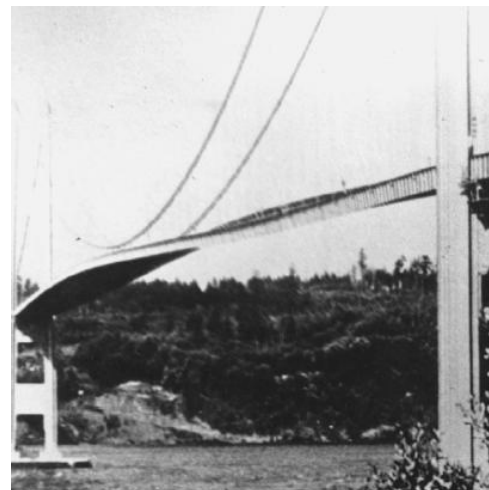
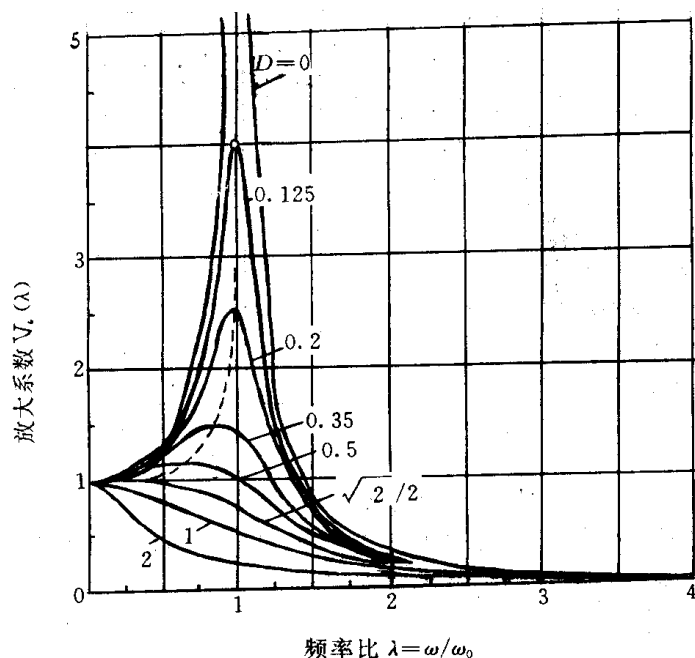
(a)受迫振动； (b)阻尼自由振动；

(c)受迫振动和阻尼自由振动的合成

受迫振动的幅—频曲线和共振 (Resonances) 现象

共振：当外激振力作用频率接近结构自振频率时，振动幅值大幅度增加的现象。

Resonances : The amplification of response that occurs under forced vibration when the period of the applied force is close to the natural period of the structure.



THE POWER OF RESONANCE CAN DESTROY A BRIDGE. ON NOVEMBER 7, 1940, THE ACCLAIMED TACOMA NARROWS BRIDGE COLLAPSED DUE TO OVERWHELMING RESONANCE.

受迫振动的产生原因

(1) 机床**内部振源**有：机床高速旋转件不平衡运动时产生周期性变化的干扰力；机床传动机构的缺陷、振动；切削过程冲击和往复运动部件的惯性力。

(2) 机床**外部振源**多半是由基地传给机床的。

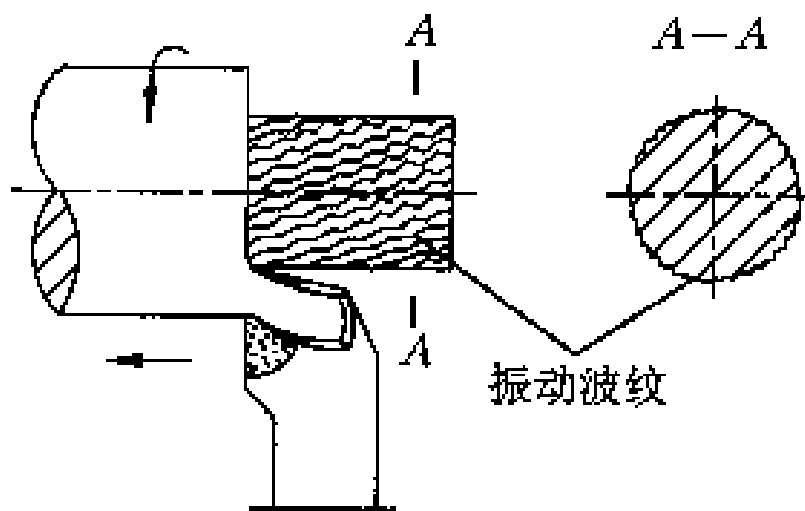
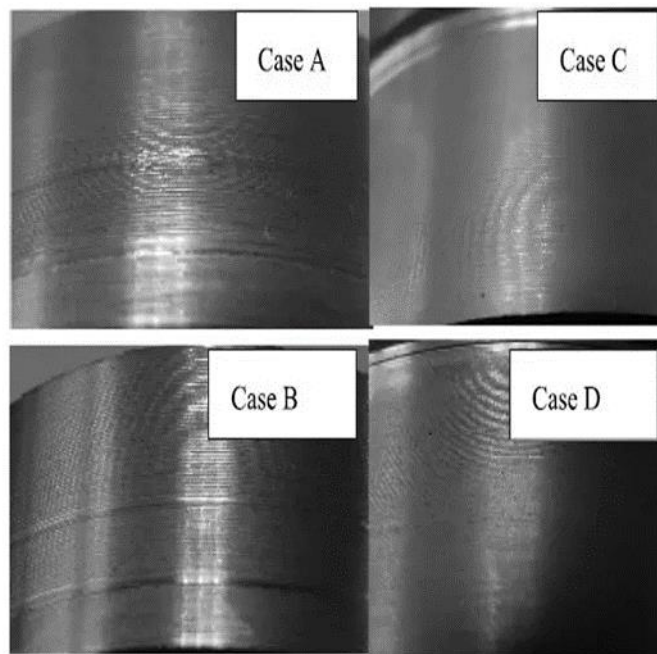


图 1-87 加工表面的振动波纹



2、减小或消除受迫振动的途径

(1) 消除或减小激振力

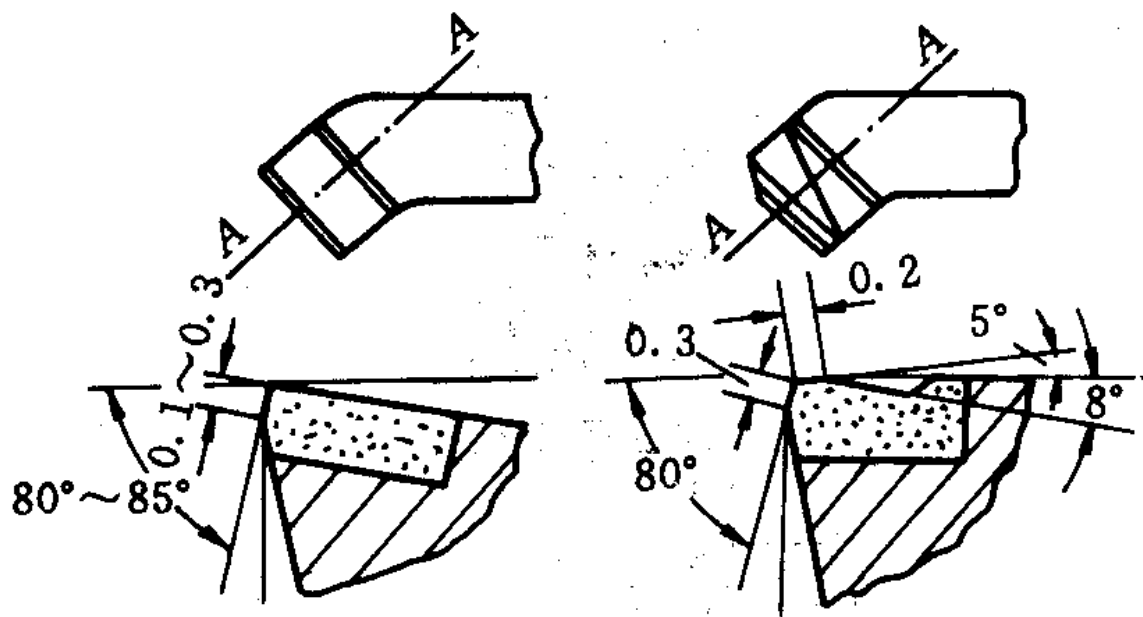
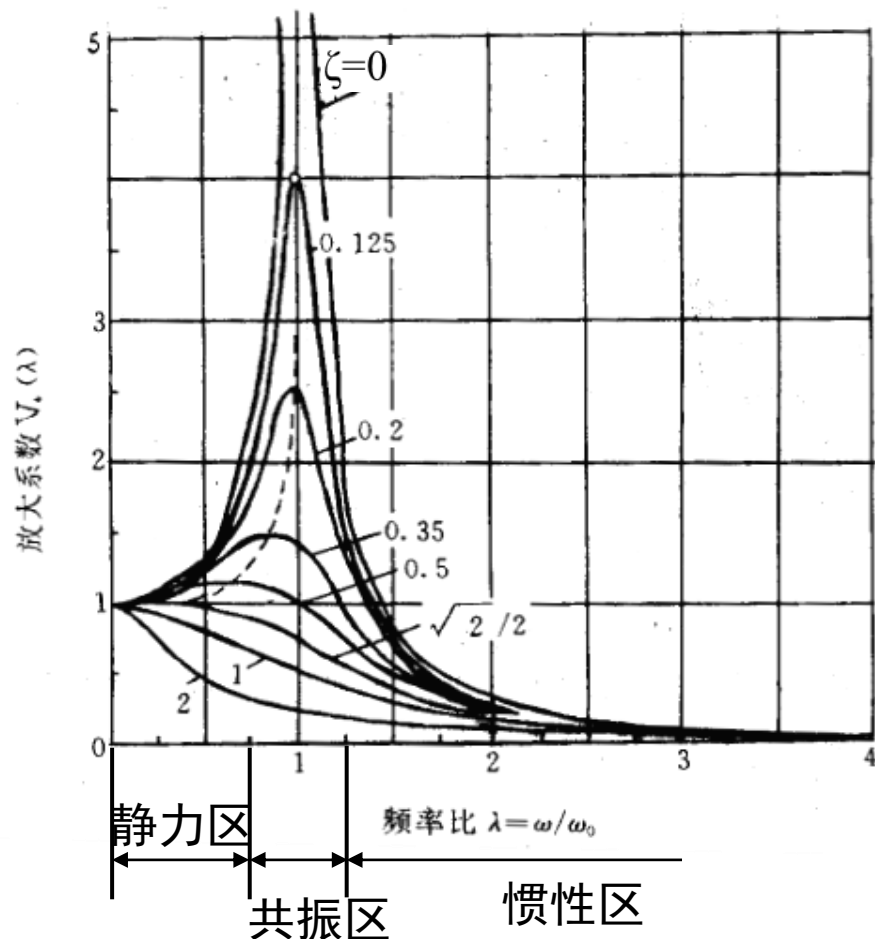


图 5-25 防振车刀

(2) 改善加工系统的动态特性

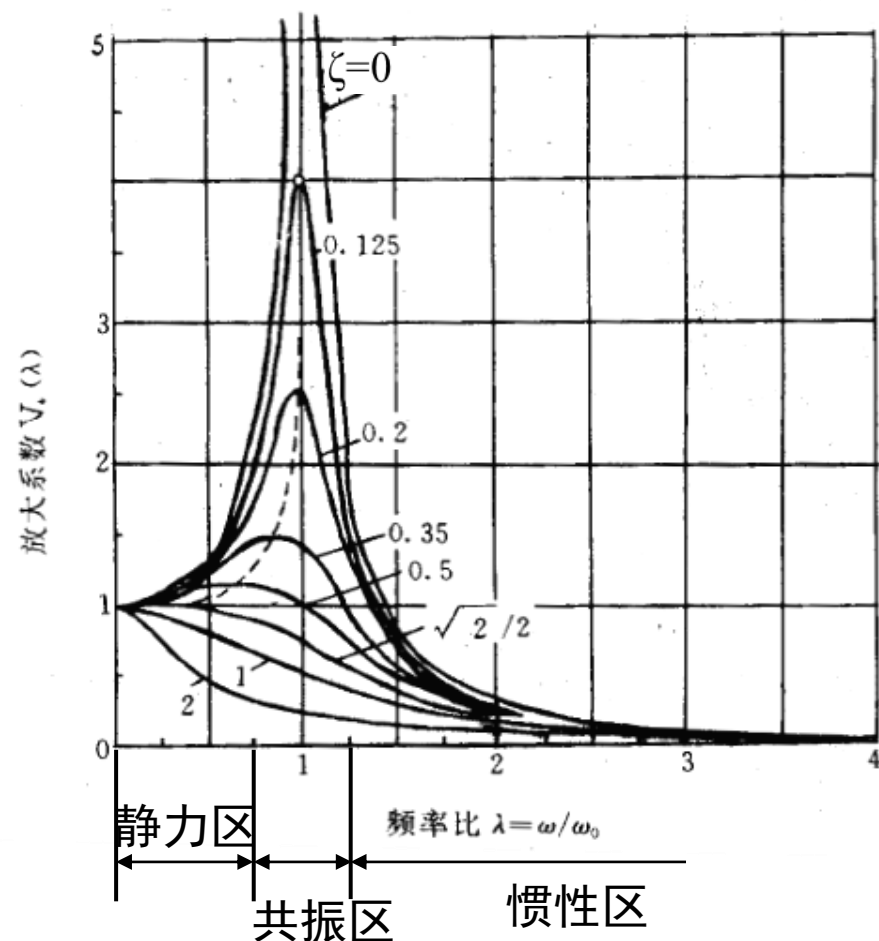
- 当激振力的频率很小 ($\omega=0$ 或 $\lambda=\omega/\omega_0 \ll 1$) 时, 振幅放大系数趋近于1, 此时的振幅相当于把激振力作为静载荷加载系统上, 使系统产生静位移。这种现象发生在 $0 \leq \lambda \leq 0.7$ 的范围, 称此范围为**准静态区**。

在该区内增加系统的静刚度即可减少振动。



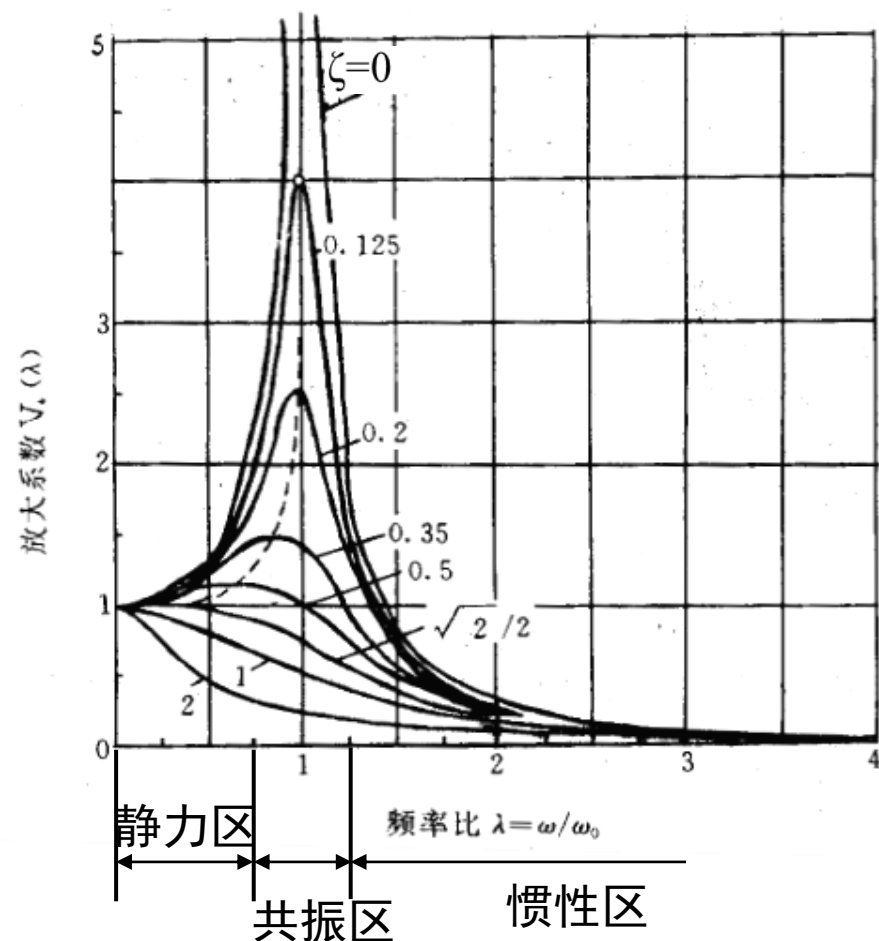
- 当激振力的频率增大时， λ 也逐渐增大，振幅迅速增大。
- 当 λ 接近或等于1时，振幅急剧增加，产生共振，将 $0.7 \leq \lambda \leq 1.3$ 的区域称为共振区。工程上通常把固有频率前后20%~30%的区域作为禁区以免共振。

改变系统固有频率、改变激振力的频率、提高阻尼比、增加静刚度等，均有消振的作用。



- 当激振频率增大到 $\lambda \gg 1$ 时，振幅放大系数趋近于0，振幅迅速下降，甚至振动消失。这表明振动系统的惯性跟不上快速变化的激振力，这个区域称为**惯性区**，范围为 $\lambda \geq 1.3$ 。

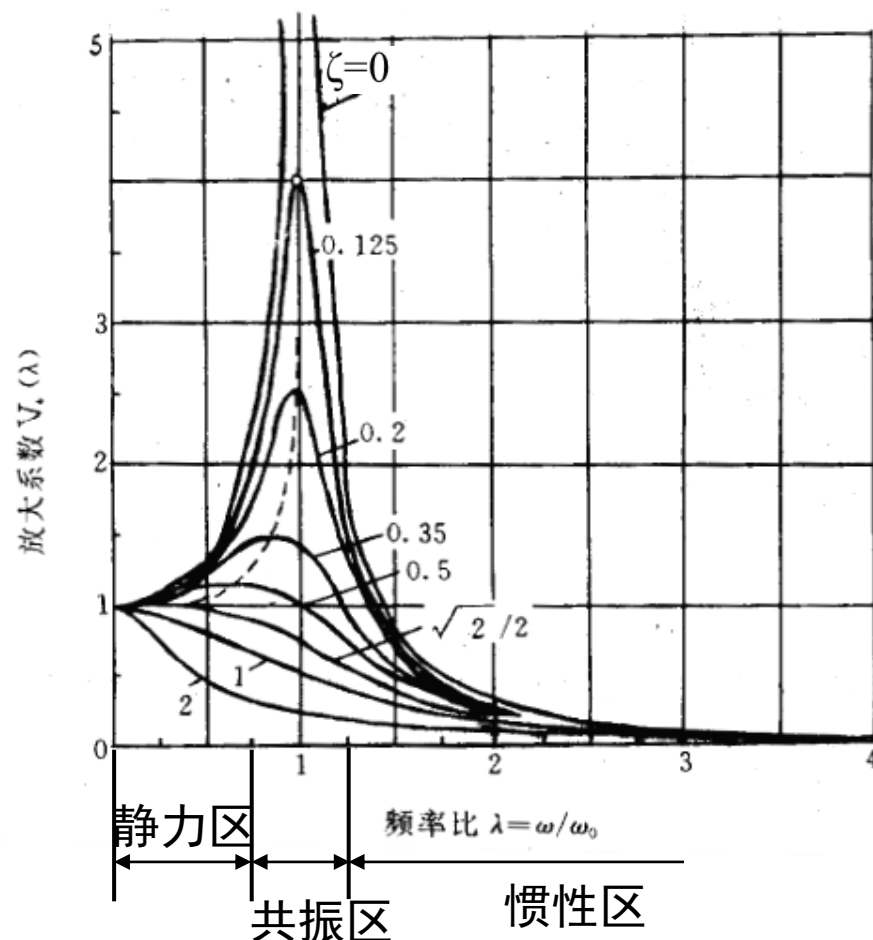
在惯性区内，阻尼的影响大大减小，系统的振幅小于静位移，并且可用增加系统的质量来提高系统的抗振性。



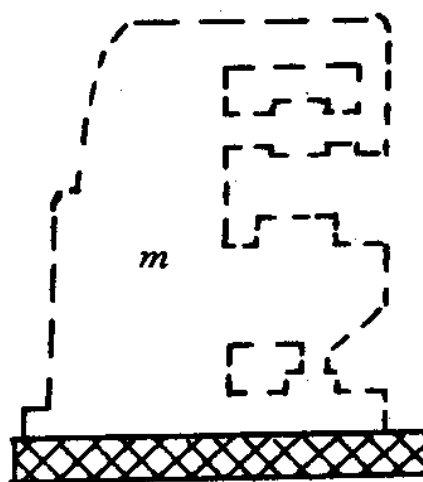
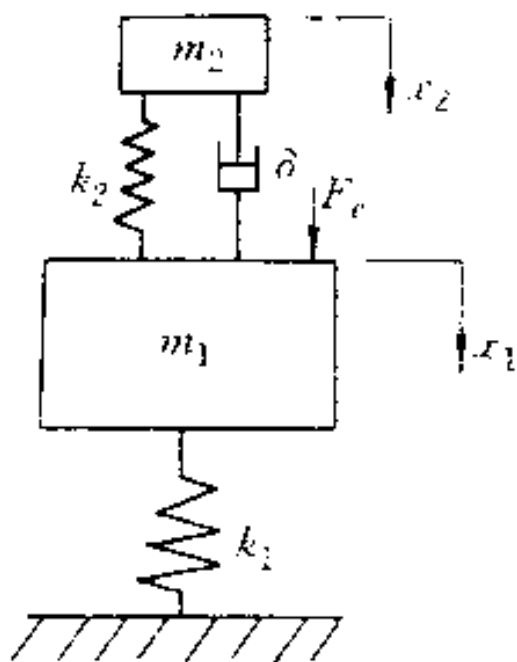
动刚度的概念：当系统在周期性动载荷作用下，交变力的幅值与振幅（动态位移）之比。

$$k_d = F/A = k\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}$$

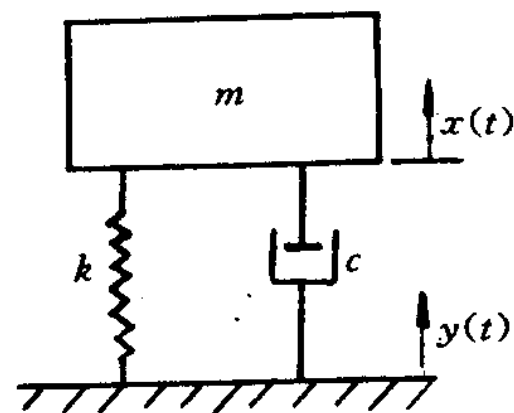
- 当激振频率 $\omega=0$ （即 $\lambda=0$ ）时，动载荷变为静载荷，且 $k_d=k$ ，系统产生静位移 A_0 ；
- 当 $\omega=\omega_0$ 共振时， k_d 出现最小值。在相同频率比的条件下，随着阻尼比 ζ 增大，系统的动刚度增大，则系统的抗振性增强。



(3) 采用减振和隔振装置



(a)



(b)

图 2-23 单自由度隔振系统

图 动力式减振器构造原理



机械垫铁

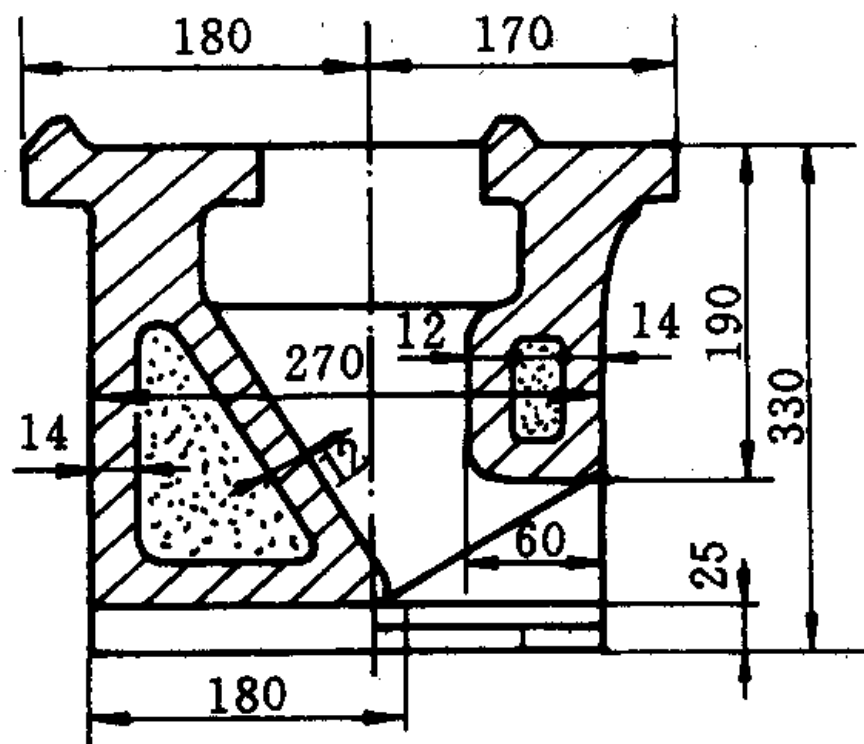


图 5-26 薄壁封砂床身

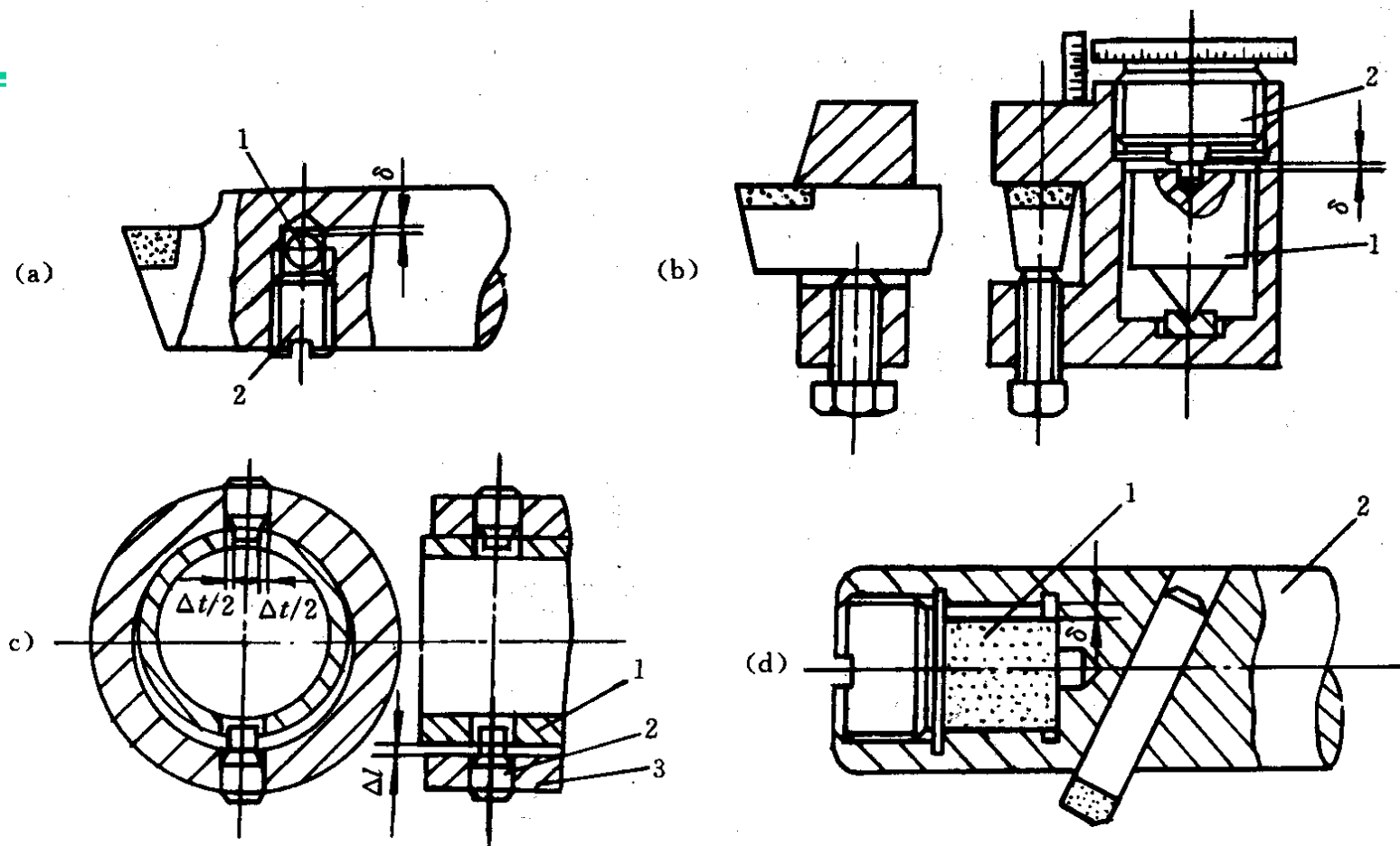


图 2-27 冲击减振器应用实例

(a) 冲击消振镗刀

1—冲击块； 2—螺塞

(b) 冲击消振车刀

1—冲击块； 2—螺塞

(c) 消除扭转振动和横向振动的冲击减振器

1—壳体； 2—碰钉； 3—冲击块

(d) 冲击减振镗杆

1—冲击块； 2—镗杆

二、机械加工中的自激振动

Self-excited vibration in mechanical manufacturing

自激振动概念和原理：自激振动是在加工过程中，在外界偶然因素激励下产生的振动，但维持振动的能量来自振动系统的本身，并与切削过程密切相关。切削停止后振动即消失，维持振动的激振力也消失。自激振动在加工过程中大量出现，有调查表明车床自激振动达65%，而受迫振动占30%。

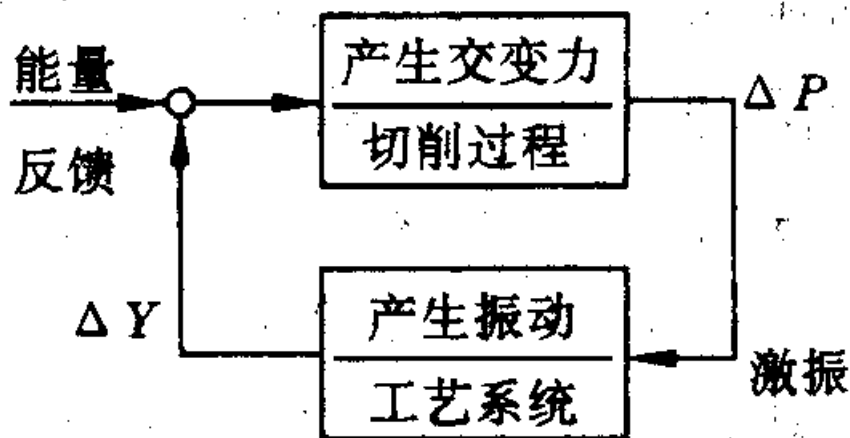
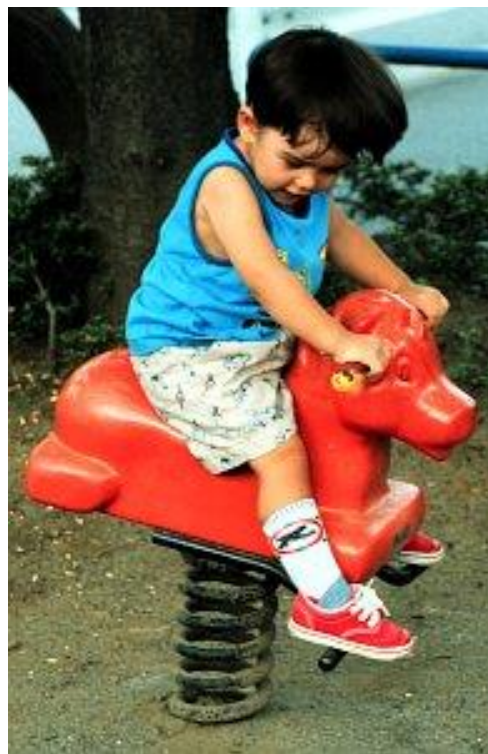
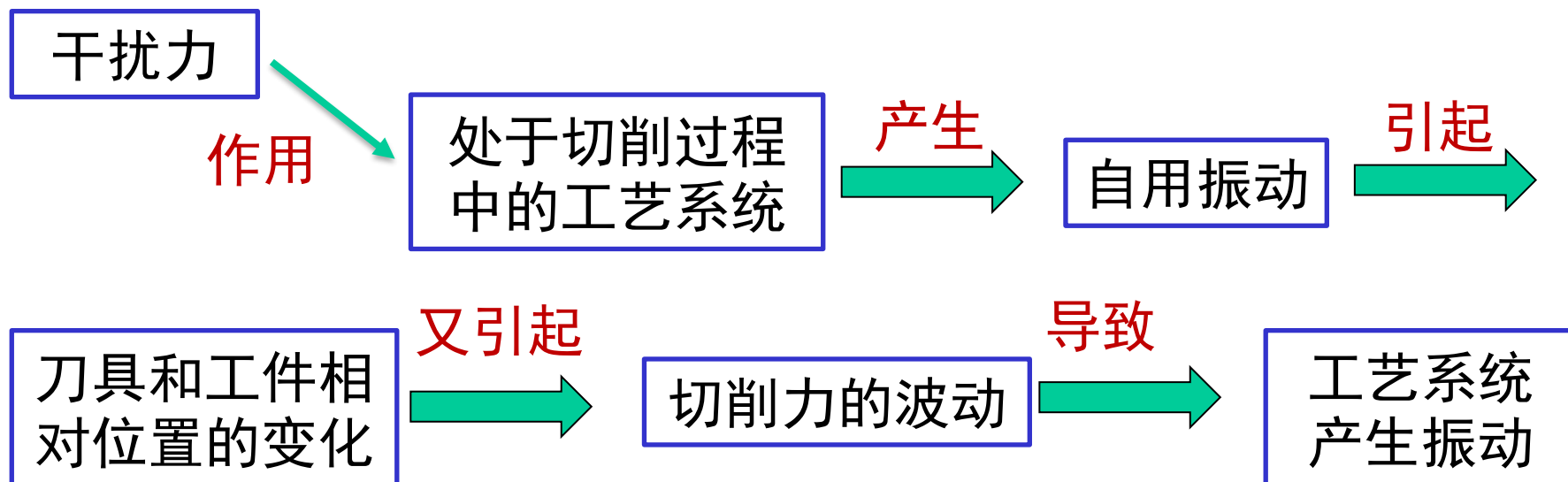


图 5-23 机床自激振动系统



自激振动的产生条件和特性

1、自激振动的产生



2、自激振动的组成

- 切削过程产生交变力 (ΔP) 使工艺系统产生振动位移(ΔY)
- 振动位移反馈给切削过程使切削力产生变化

一个闭环系统

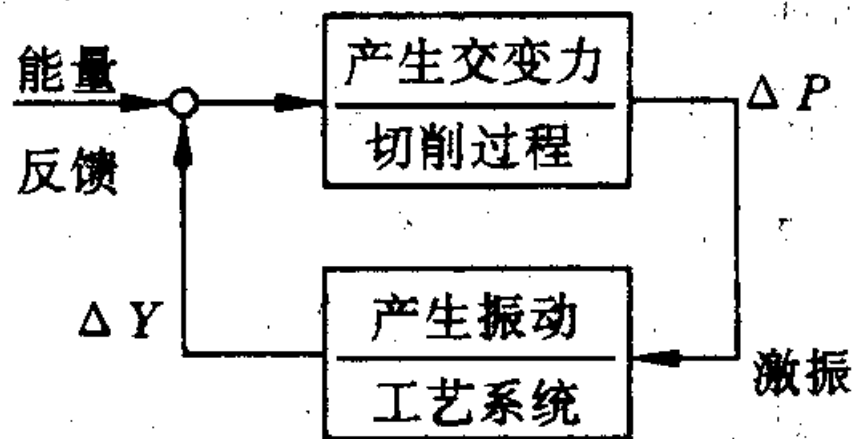


图 5-23 机床自激振动系统

自激振动特点

(1) 自激振动的形成与持续是由于加工过程本身产生的激振与反馈作用。外部振源在最初起触发作用，但**维持振动的能量来自振动系统的本身**。在切削过程中，停止切削运动，自激振动即停止。

(2) **自激振动频率一般接近于加工系统薄弱环节固有频率**，和机床加工系统的固有特性关系密切。

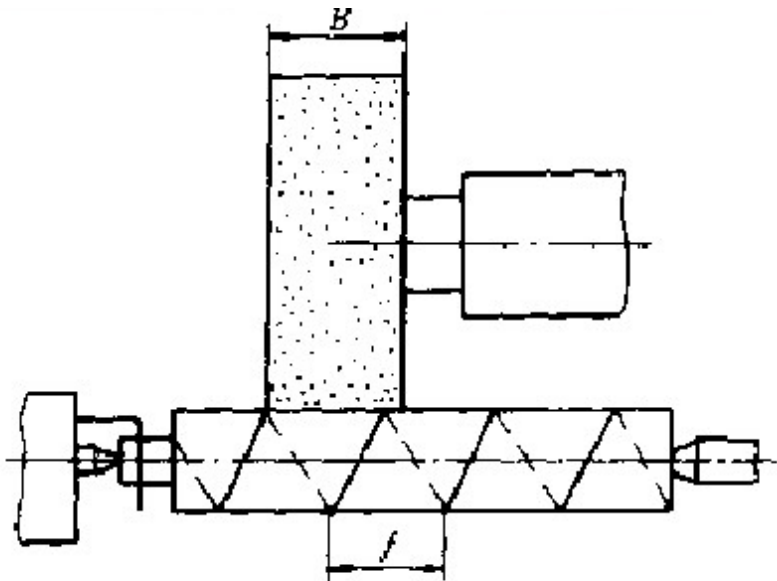
(3) 自激振动是否产生取决于一个振动周期内，输入振动系统的能量 E_+ 是否等于振动系统所消耗的能量 E_- 。**自激振动振幅大小和输入振动系统的能量多少关系密切**。如果吸收能量大于消耗能量，则振动会不断加强；如果吸收能量小于消耗能量，则振动将不断衰减而被抑制。

自激振动机理

1、再生颤振机理

Principle of regenerative chatter/flutter

在机械加工过程中由于刀具进给量一般不大，刀具必然与已切过的上一转表面接触，即产生重叠切削。

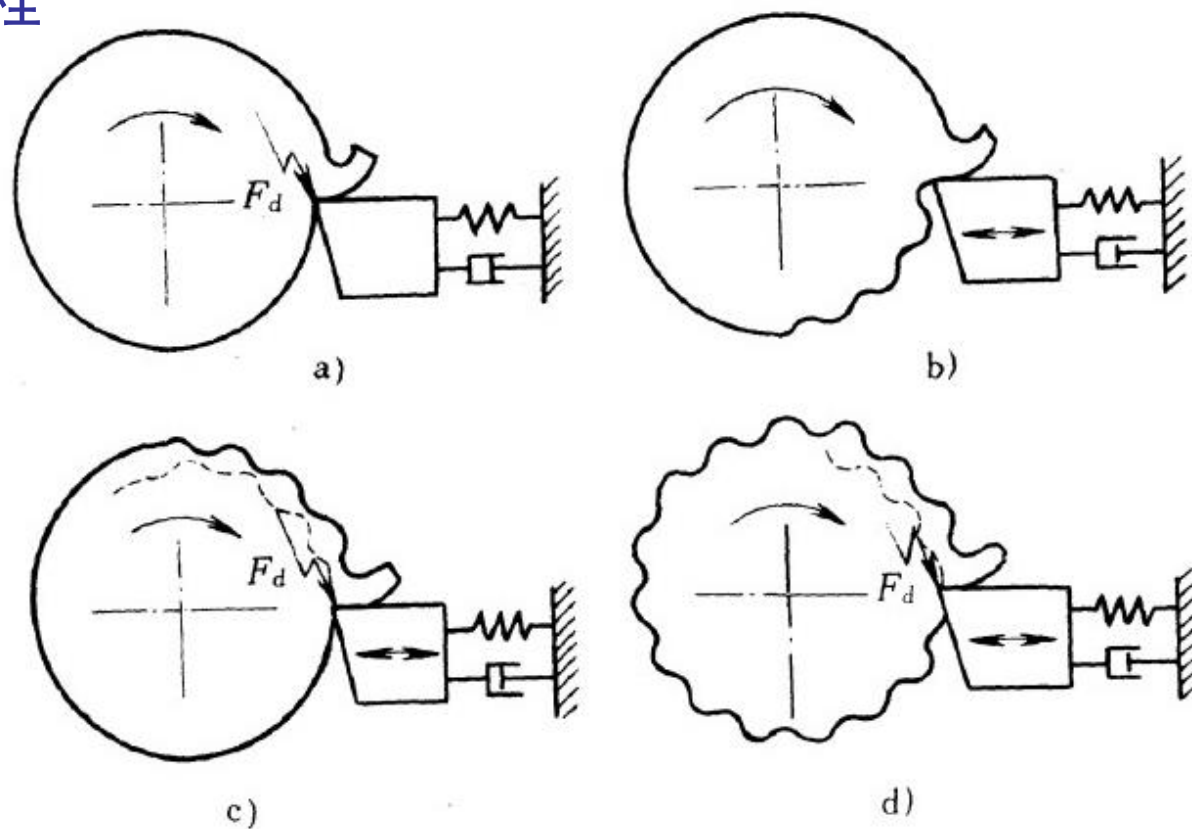


磨削时重叠切削示意图

设砂轮宽度为 B ，工件进给量为 f ，工件前后相邻两转的磨削区有重叠部分，其大小用重叠系数表示：

$$\mu = \frac{B-f}{B} \quad (0 \leq \mu \leq 1)$$

再生颤振产生过程



再生型颤振的产生过程

切削到重叠部分的振纹使切削厚度发生变化，从而引起切削力的周期改变，使刀具产生振动，在加工表面上留下新的振纹，这个振纹又影响到下一转的切削，从而引起持续的再生颤振。

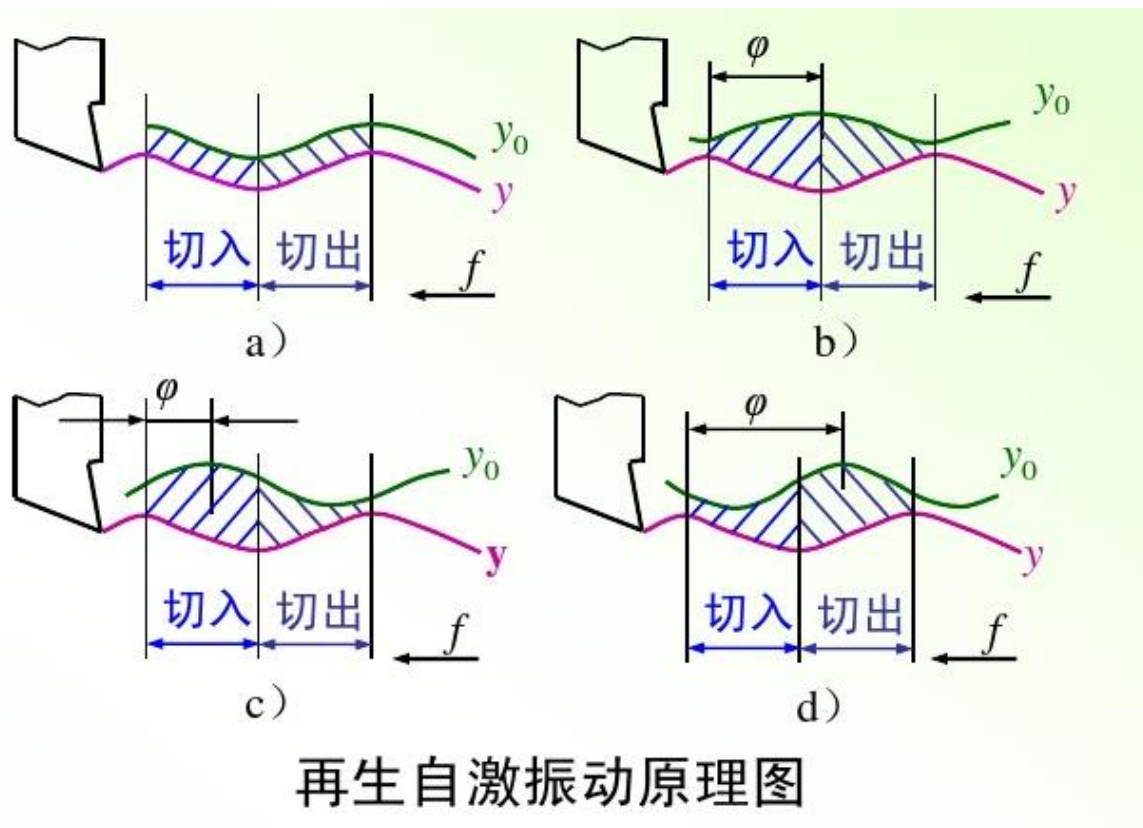
切入阶段，做负功，振动能量消耗在切削过程中；
切出阶段，做正功，切削过程部分能量输入到刀具振动系统中。



能量大小与切削力大小成正比



切削厚度越大切削力越大



所以，当切入阶段的切削厚度小于切出阶段的切削厚度，振动系统被输入的能量大于消耗能量，系统将产生再生颤振现象。

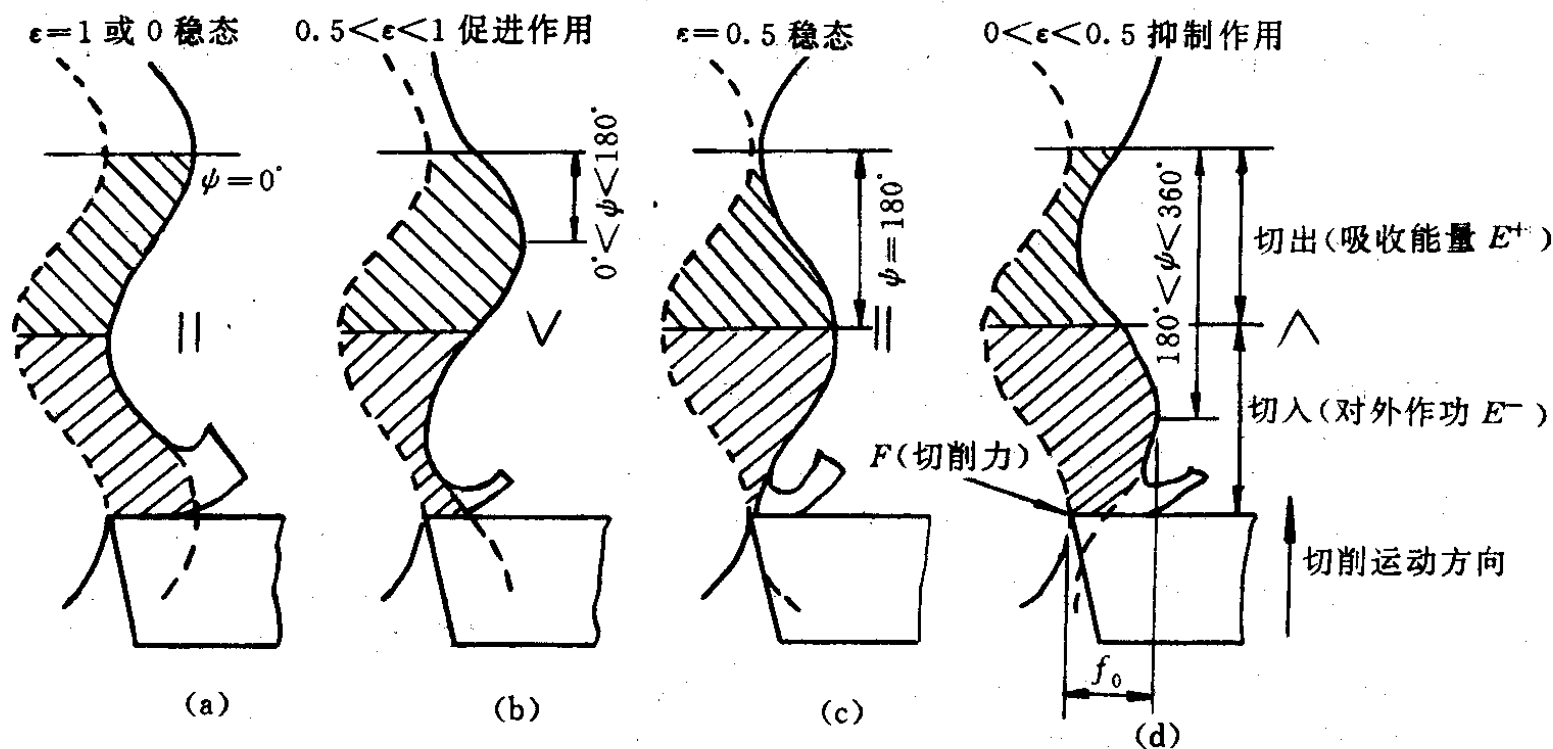


图 2-34 相位差 ψ 与振动系统能量关系

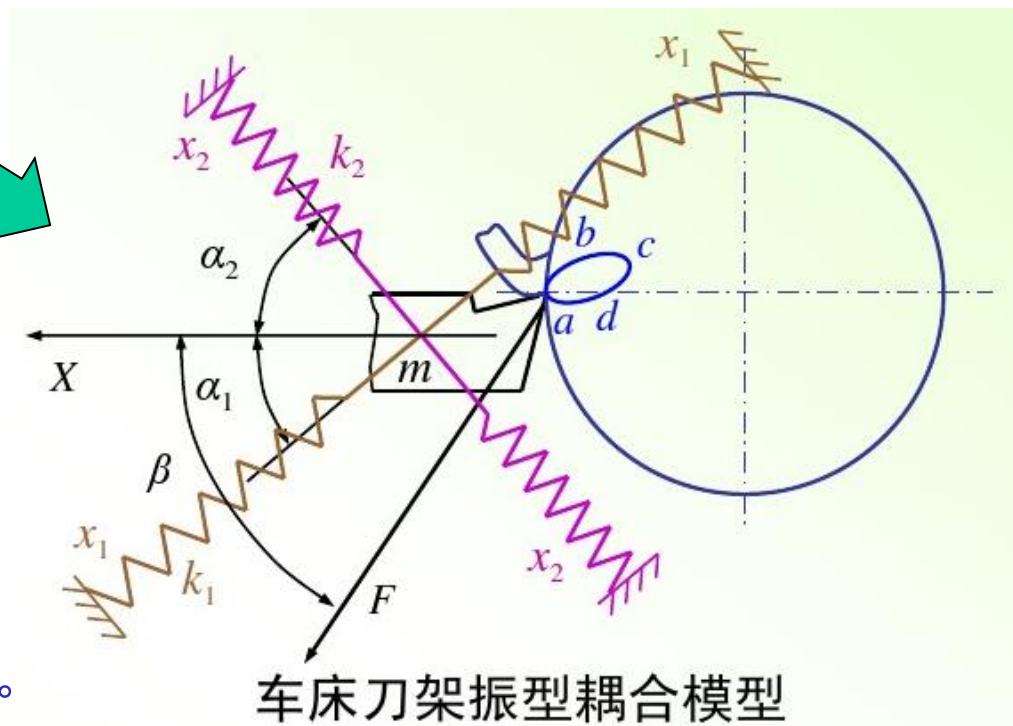
- a) 相位差为 0 ，切入与切出面积相等，系统无能量获得，不会产生颤振。
- b) 相位差 $0 \sim 180^\circ$ ，切入小于切出面积，系统有能量获得，产生颤振。
- c) 相位差为 180° ，切入与切出面积相等，系统无能量获得，不产生颤振。
- d) 相位差 $180^\circ \sim 360^\circ$ ，切入大于切出面积，系统无能量获得，不产生颤振。

2、振型耦合机理

Principle of coupled modes chatter/flutter

振动耦合理论是将工艺系统看做是两个自由度的振动系统

将车床刀架简化为两自由度振动系统，等效质量 m 用相互垂直的等效刚度分别为 k_1 、 k_2 两组弹簧支撑



a) $k_1=k_2$ ，轨迹为直线，无能量输入。

b) $k_1<k_2$ ，轨迹 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 为一顺时针方向椭圆，切入半周期内的平均切削厚度比切出半周期内的小，系统有能量输入，振动能够维持。

c) $k_1>k_2$ ，轨迹 $a \rightarrow d \rightarrow c \rightarrow b$ ，且切入半周期内的平均切削厚度比切出半周期内的大，系统无能量输入。

2、抑制自激振动的途径

(1) 改善工艺参数

适当增大刀具的主偏角 κ_r 和前角 γ

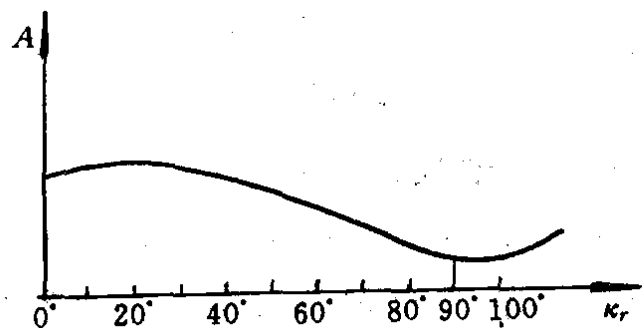


图 2-48 主偏角对振动的影响

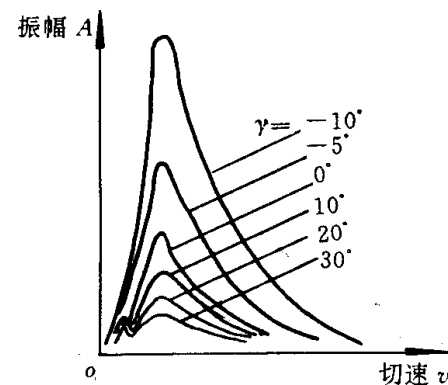
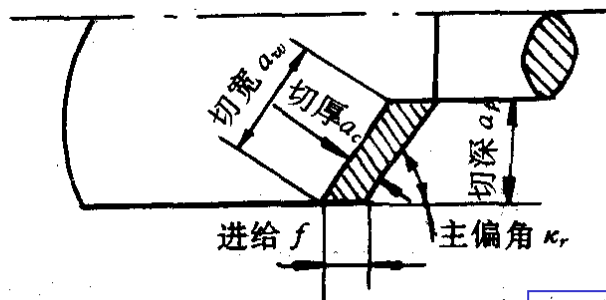


图 2-47 前角对振动的影响

后角取 $2^{\circ} \sim 3^{\circ}$ ，或磨出 $0.1 \sim 0.3$ mm的负倒棱

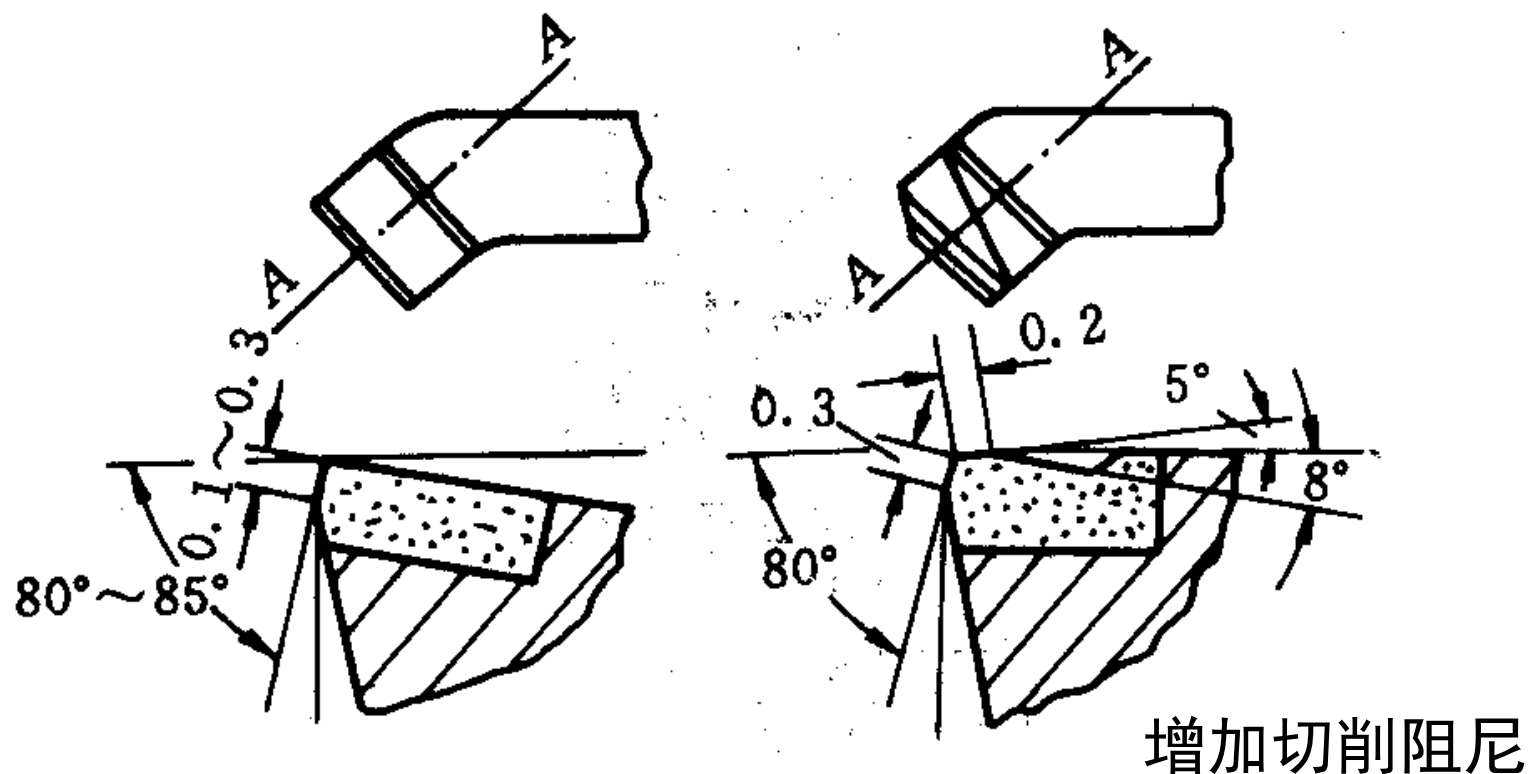
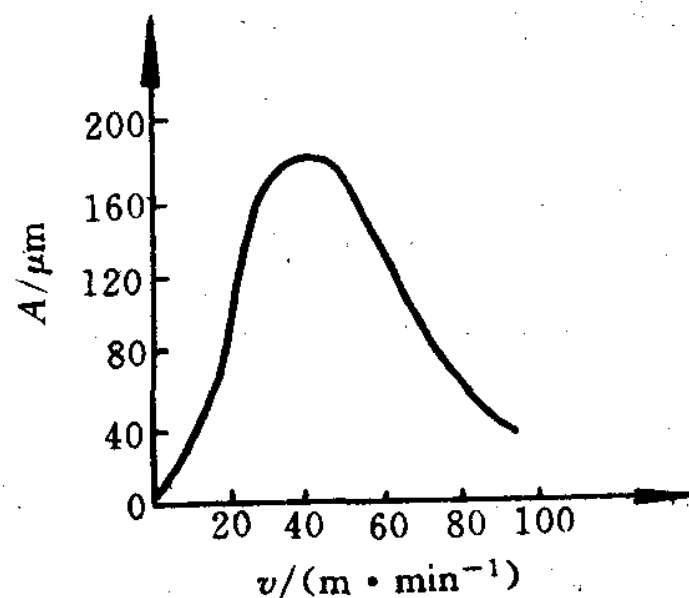
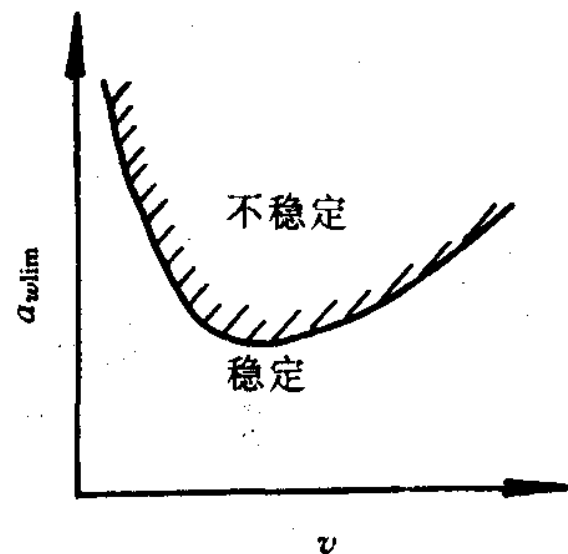


图 5-25 防振车刀

选择高速或低速切削（避开20~70 m/min）



(a)

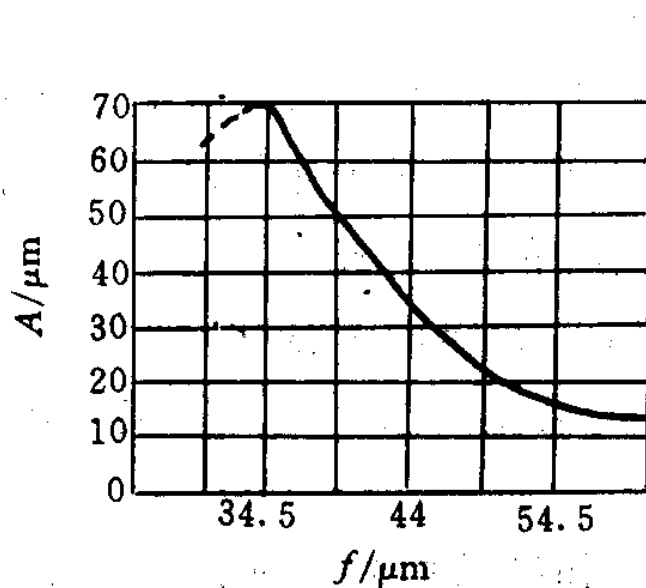


(b)

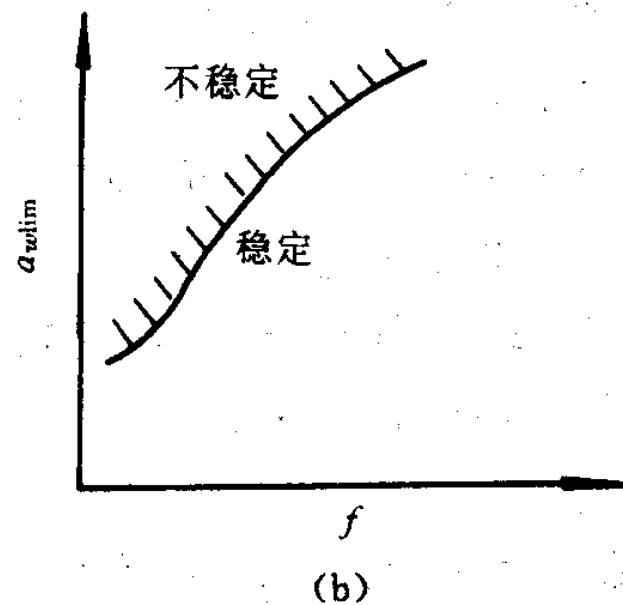
图 2-44 车削速度对切削稳定性的影响

(a) 切速 v 与振幅 A 的关系曲线； (b) v 与 $a_{w\text{lim}}$ 的关系曲线

f 的增加振幅减小



(a)

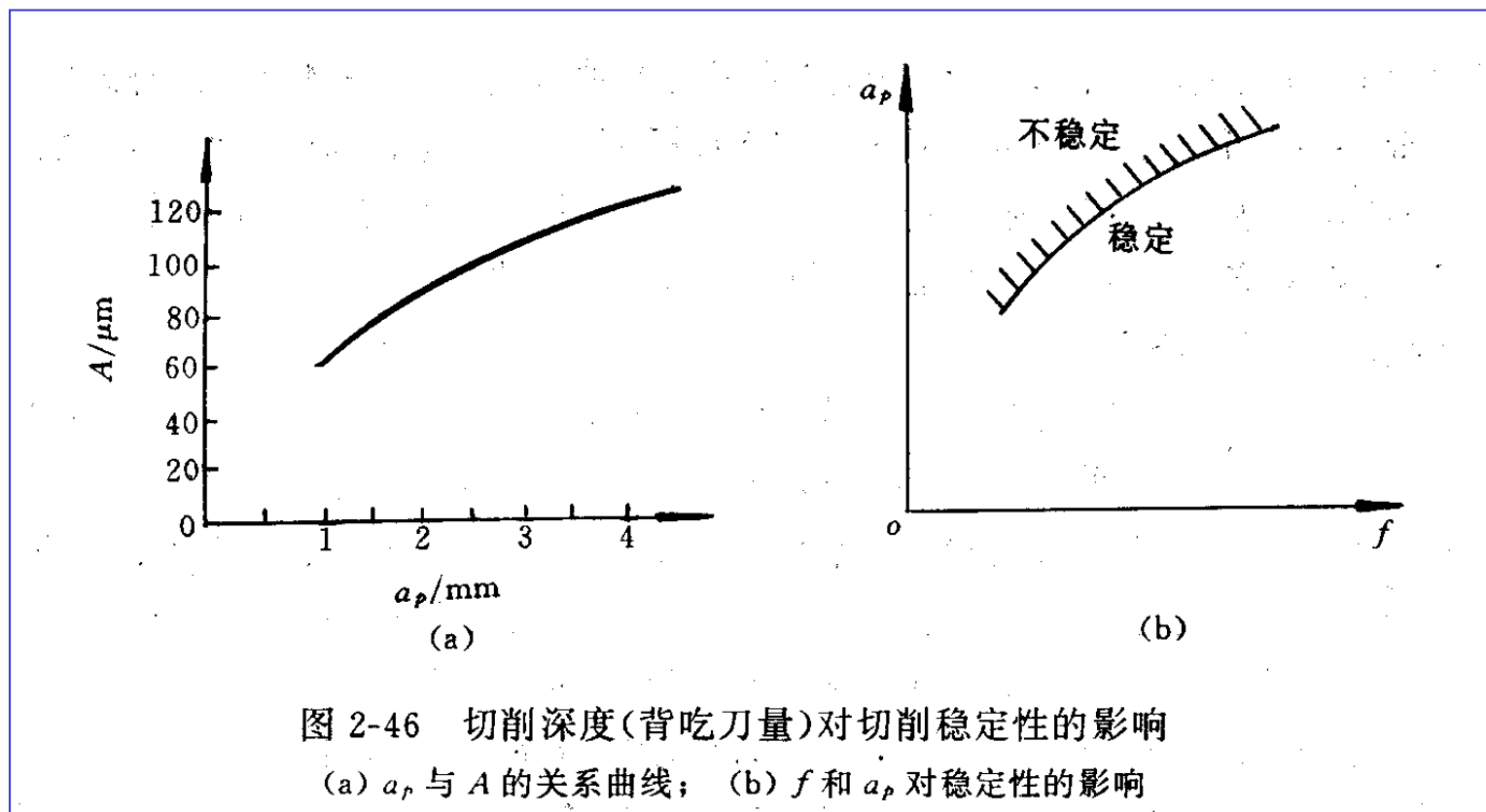


(b)

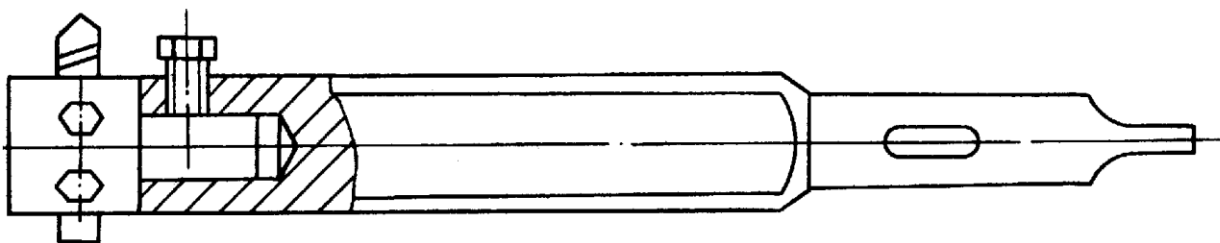
图 2-45 进给量 f 对切削稳定性的影响

(a) f 与 A 的关系曲线; (b) f 与 $a_{w\text{lim}}$ 的关系曲线

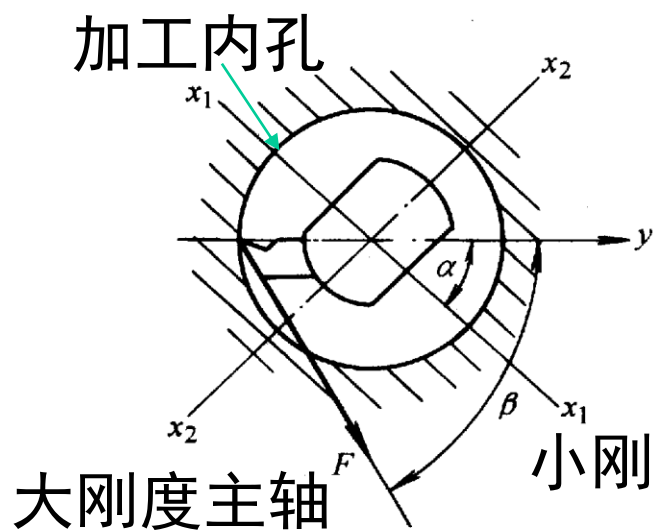
减小重叠系数 μ



(2) 改进系统结构: 提高系统的刚度和调整刚度轴方向

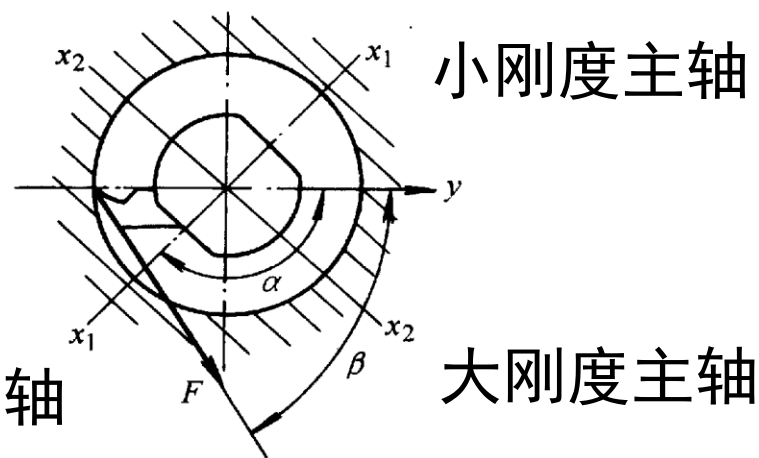


a)



b)

容易颤振



c)

削扁镗杆

(3) 采用减振装置

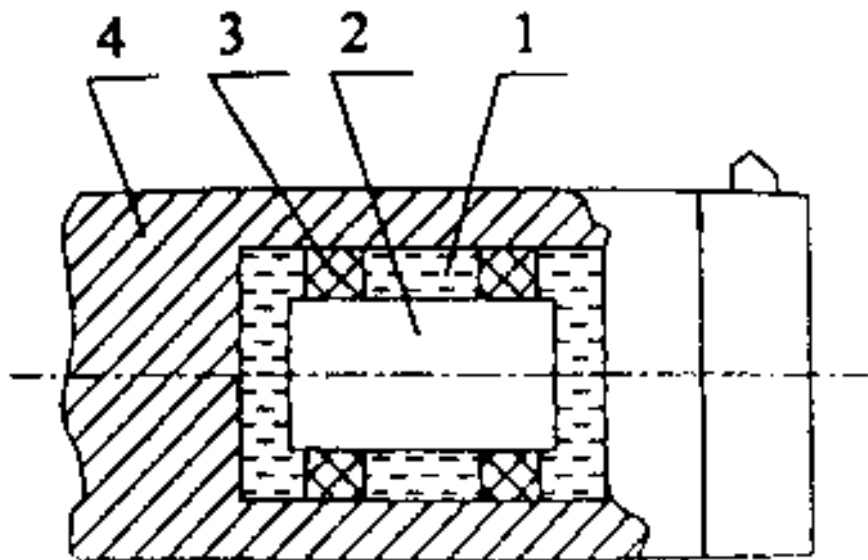


图 阻尼式消振镗杆
1—粘性机油；2—冲击块；3—
橡皮环；4—镗杆

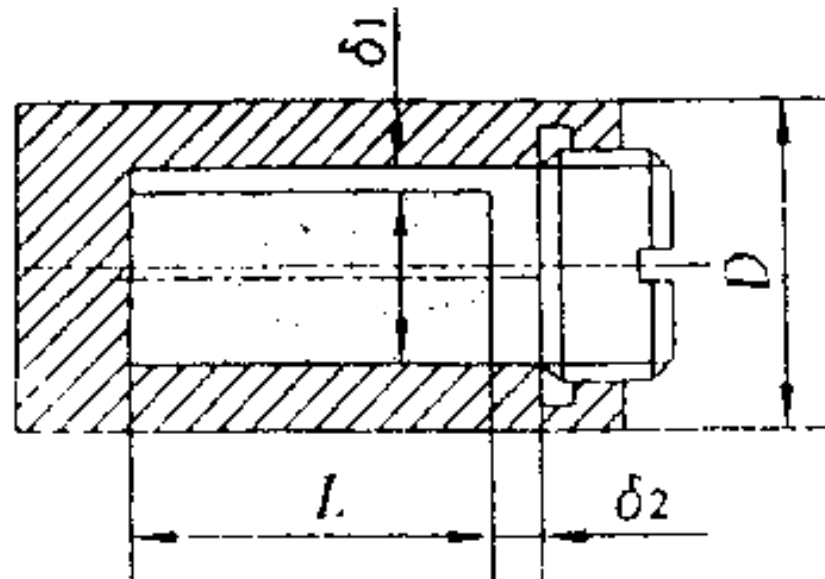


图 冲击式消振镗杆
1—镗杆；2—冲击块

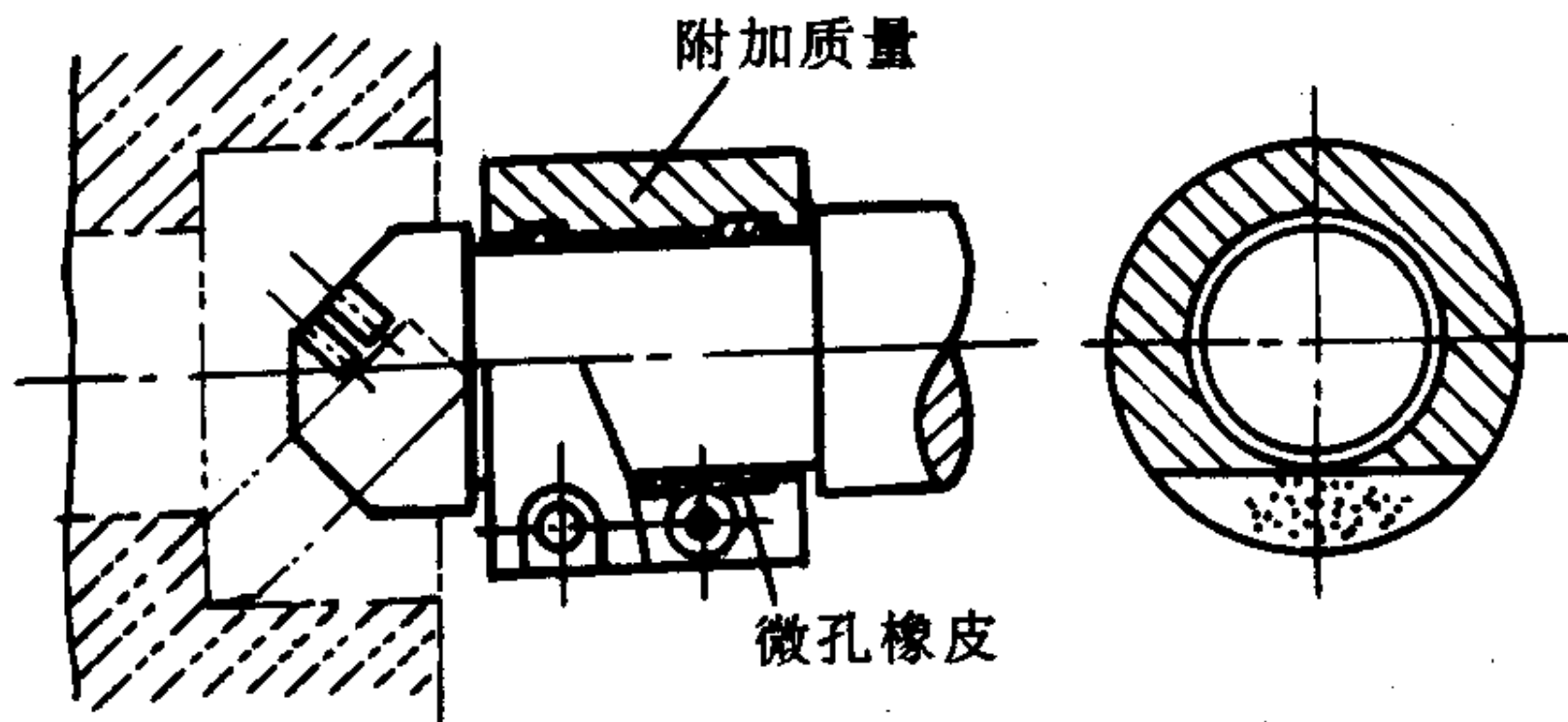


图 动力式减振镗杆

Thanks for your attention!

进入下一章节