

切削原理与控制

第九章 已加工表面质量

王大中

上海工程技术大学

第一节 已加工表面质量的概念

已加工表面质量也称为表面完整性，它对机器零件的使用性能和机器的可靠性有重大影响。包括两方面内容——

表面几何学

零件外层表面的几何形状，用表面粗糙度表示。

如塑性变形、硬度变化、微观裂纹、残余应力、晶粒变化、热损伤区及化学性能等。

表面层材质的变化

在一定深度的表面层内出现变质层，晶粒组织严重畸变，金属的力学、物理、化学性质均发生变化。

已加工表面质量评定标志

- 1 表面粗糙度。
- 2 表面层的加工硬化程度及硬化层深度。
- 3 表面残余应力的性质、大小。

第二节 已加工表面的形成过程

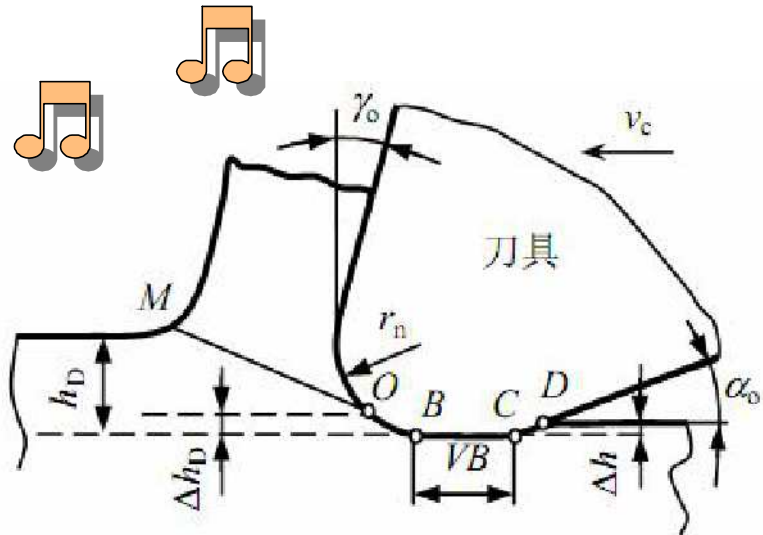
一 已加工表面形成过程

考虑因素

刀具的刀刃都具有一个半径 r_β 的钝圆。

刀具磨损，形成一段 $\alpha_{oc}=0^\circ$ 的棱面，后刀面磨损棱面VB。

1. 沿剪切面OM方向滑移成为切屑。
2. 切削层厚度 h_D 。
3. 留下了一薄层 Δh_D 。
4. O点之上变成了屑沿前刀面流出。
5. O点之下在刃口钝圆挤压下产生弹性塑性变形，留在已加工表面上。
6. 切削刃钝圆部分OB、磨损棱面BC和后刀面CD三部分共同构成后刀面上的接触长度，这部分对已加工表面的质量有很大影响。



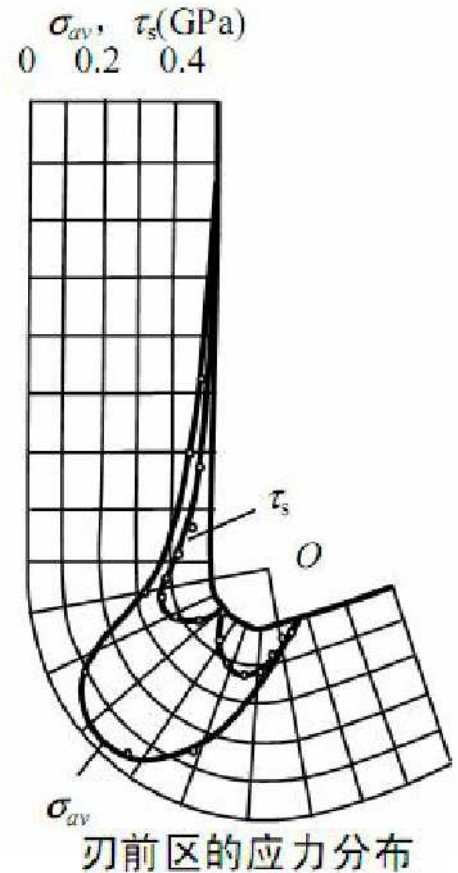
已加工表面的形成过程

第二节 已加工表面的形成过程

二 刃前区的应力分布

用光弹法测定的刃前区应力分布图

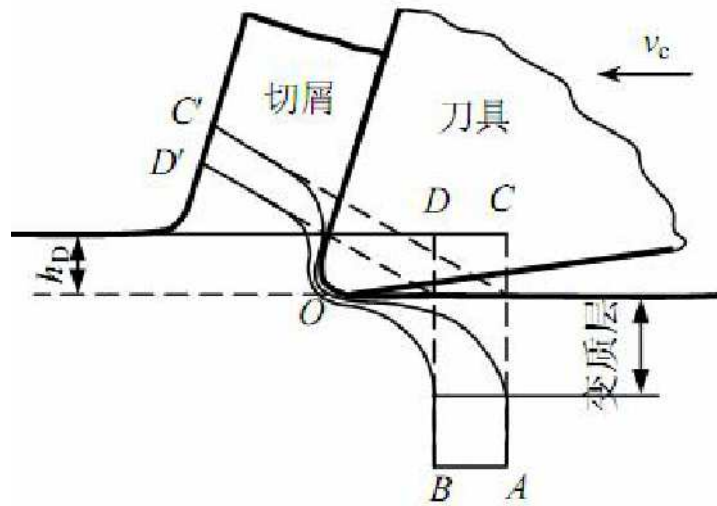
1. 正应力 σ_{av} 在O点处最大，在O点两侧急剧减小。
2. 剪应力 τ_s 在O点处为零，在O点两侧逐渐增加，并且方向相反，从而使切削层金属在O点处分离。
3. O点的位置与刃口钝圆半径 r_β 有关，当 r_β 增大时，O点上移，相应的 Δh_D 也增大。



第二节 已加工表面的形成过程

三个变形区综合考虑

1. 切削层金属进入第一变形区时，晶粒因压缩而变长，因剪切滑移而倾斜，晶粒拉伸的更长，成为包围在切削刃周围的纤维层，最后在O点断裂。
2. 上面部分变成切屑流出，下面部分绕过切削刃沿后刀面流出，并继续经受变形而成为已加工表面的表层。
3. 已加工表面表层的金属纤维被拉伸的更长更细，其纤维方向平行于已加工表面，这层具有和基体金属组织不同性质的表层金属被称为加工变质层。



刃前区的应力分布

第三节 已加工表面粗糙度

一 表面粗糙度产生的原因

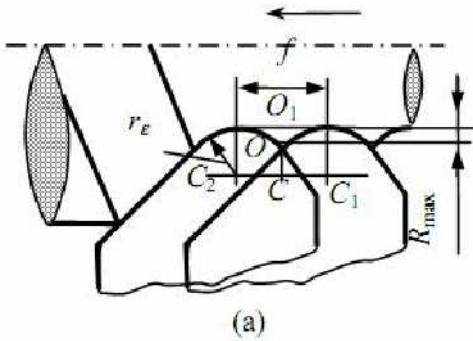
几何因素所产生的粗糙度：残留面积的高度

1 残留面积：一小部分金属未被切下来，残留在已加工表面上。
影 响：残留面积高度直接影响已加工表面的横向粗糙度。

1) 刀尖圆弧半径 $r_\epsilon = 0^\circ$ 2) 刀尖圆弧半径 $r_\epsilon \neq 0^\circ$

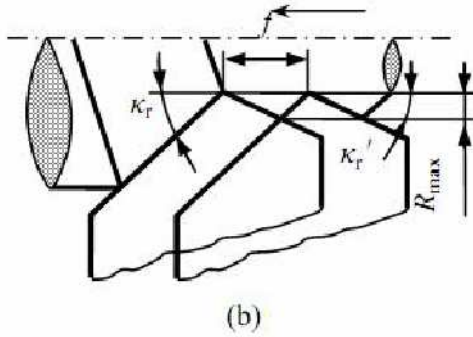
$$R_{\max} = \frac{f}{\cot \kappa_r + \cot \kappa_r'}$$

主偏角 κ_r 、负偏角 κ_r'
 v_f



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

由于 $R_{\max} \ll r_\epsilon$ 所以 R_{\max}^2 可以忽略不计



$$R_{\max} \approx \frac{f^2}{8r_\epsilon}$$

R_{\max}
残留面积高度

第三节 已加工表面粗糙度

一 表面粗糙度产生的原因

不稳定因素所产生的粗糙度

1 积屑瘤：靠近切削刃及刀尖的前刀面上产生积屑瘤，积屑瘤硬度很高，可代替切削刃进行切削。

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">1) 积屑瘤引起过切，导致各处的过切量不一致。2) 一部分破碎的积屑瘤碎片嵌入已加工表面形成鳞片状毛刺。3) 减少积屑瘤，可以有效的降低表面粗糙度。 |
|--|

2 鳞刺：已加工表面上出现的鳞片状毛刺。
发生于中低速、大进给量、较小前角切削塑性、韧性较大的金属时。

第三节 已加工表面粗糙度

鳞刺的形成过程

- (1) 抹拭阶段 I。前一鳞刺已经形成，新鳞刺还未出现。
 - (2) 导裂阶段 II。切屑代替前刀面挤压切削层，切削刃的前下方，切屑与已加工表面之间出现一个裂口，即导裂。第 II 阶段历时远比第 I 阶段短。
 - (3) 层积阶段 III。切屑逐层积聚参加挤压切削层的工作，随着层积过程的发展，切削厚度将逐渐增大。
 - (4) 切顶阶段 IV。当层积金属达到一定厚度后，切屑又重新开始沿前刀面流出，同时切削刃切出鳞刺的顶部。
- 一个鳞刺的形成过程便告结束



鳞刺形成的四个阶段

第三节 已加工表面粗糙度

切削过程中的变形

3 切削过程中的变形

(1) 挤裂切屑

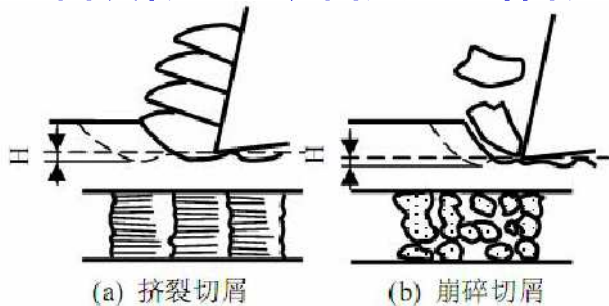
挤裂或单元切屑的形成过程中，切屑单元带有周期性的断裂，这种断裂要深入到切削表面以下，从而在加工表面上留下挤裂的痕迹而形成波浪形。

(2) 崩碎切屑

崩碎切屑的形成过程中，从主切削刃处开始的裂纹在接近主应力方向斜着向下延伸形成过切，造成已加工表面的凸凹不平。

(3) 刀刃两端隆起

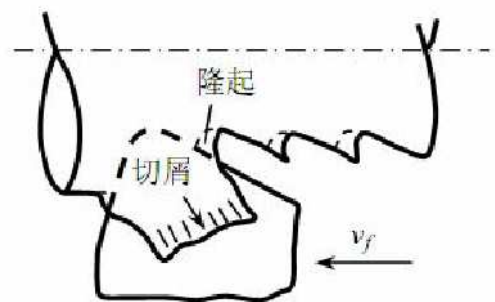
在切削刃两端没有来自侧面的束缚力，在切削刃两端的已加工表面及待加工表面处，工件材料被挤压产生隆起使表面粗糙度增大。



(a) 挤裂切屑

(b) 崩碎切屑

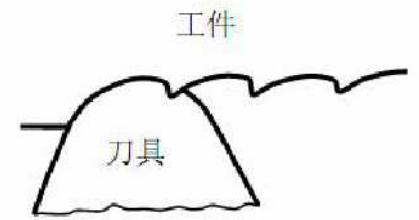
不连续型切屑的加工表面状态



刀刃两端工件材料的隆起

第三节 已加工表面粗糙度

刀具的边界磨损



刀具的边界磨损

4 刀具的边界磨损

刀具磨损后有时会在副后面上产生沟槽形边界磨损。在已加工表面上形成锯齿状的突出部分，造成表面粗糙度增大。

5 切削刃与工件相对位置变动

不稳定的因素容易在加工系统中诱发起自激振动，引发刀具、工件之间的位置变化，使已加工表面粗糙度增大。

不稳定因素

机床主轴轴承回转精度、各滑动导轨面的形状误差等会影响运动机构运动的平稳性。材料的不均匀、切屑的不连续等因素会造成切削力的波动。

第三节 已加工表面粗糙度

二 影响表面粗糙度的因素

1 刀具方面

刀尖圆弧半径 r_ϵ \uparrow and 副偏角 κ_r' \downarrow \rightarrow 残留面积 \downarrow

2 工件方面

调质处理 \rightarrow 提高硬度 and 降低塑性 \rightarrow 积屑瘤和鳞刺 \downarrow

3 切削条件方面

- 速度 \uparrow \rightarrow 积屑瘤和鳞刺 \downarrow
- 进给量 \downarrow \rightarrow 残留面积 \downarrow 积屑瘤和鳞刺 \downarrow
- 切削液 \uparrow \rightarrow 变形摩擦 \downarrow \rightarrow 积屑瘤和鳞刺 \downarrow

第四节 加工硬化

一 加工硬化产生的原因

1. 加工硬化产生的原因

已加工表面的金属晶格发生扭曲，晶粒被拉长、破碎，阻碍了金属进一步变形而使金属强化，硬度显著提高。

2. 加工硬化的表示方法

1) 硬化程度N —已加工表面的显微硬度增加值，对原始显微硬度的百分比。

$$N = \frac{H - H_0}{H_0} \times 100\% \quad \begin{array}{l} H_0 \text{—基体的显微硬度值, } H_v; \\ H \text{—硬化层显微硬度值, } H_v。 \end{array}$$

也可以用加工前、后的硬度值之比表示，即

$$N = \frac{H}{H_0} \times 100\%$$

第四节 加工硬化

一 加工硬化产生的原因

2) 硬化层深度 Δh_d

硬化层深度是指已加工表面至未硬化处的垂直距离 Δh_d ，单位为 μm 。

通常 N 和 Δh_d 与工件材料和加工方法有关，下表所示为常用方法加工钢件时的加工硬化情况。

钢件表面的硬化深度 Δh_d 和硬化程度 N

加工方法	平均硬化深度 $\Delta h_d/\mu m$	平均硬化程度 $N/\%$
高速车削	30~50	120~150
精车	20~60	140~180
钻孔	180~200	160~170
拉削	20~75	150~200
滚(插)齿	120~150	160~200
外圆磨削(未淬火)	30~60	140~160
研磨	3~7	110~117

第四节 加工硬化

二 影响加工硬化的因素

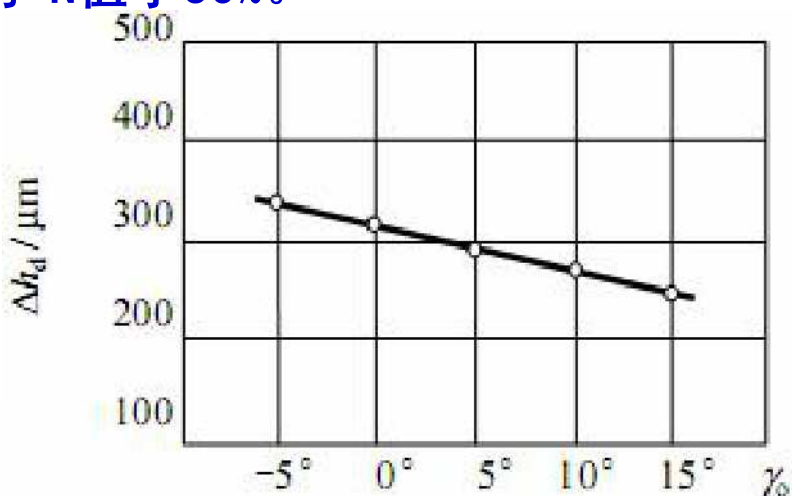
1) 工件材料

工件材料的硬度越低、塑性越大、熔点越高、强化就会越严重。就结构钢而言，含C量少、塑性变形大，硬化严重。例如：软钢 $N=140\% \sim 150\%$ ，硬钢 $N=120\% \sim 130\%$ 。高锰钢强化指数大，硬化程度可达 200%以上。有色金属熔点低，容易弱化，所以硬化情况比结构钢小很多，例如：铝比钢的 N 值小75%，铜比钢的 N 值小30%。

2) 刀具几何参数与磨损

(1) 前角 γ_0 越大，金属的塑性变形越小，硬化层深度 Δh_d 越小，如图所示。

$\gamma_0 - \Delta h_d$ 的关系曲线



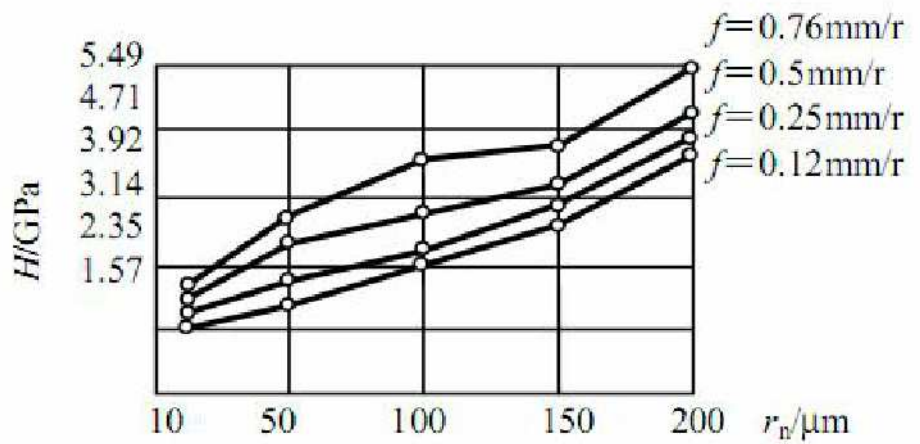
第四节 加工硬化

二 影响加工硬化的因素

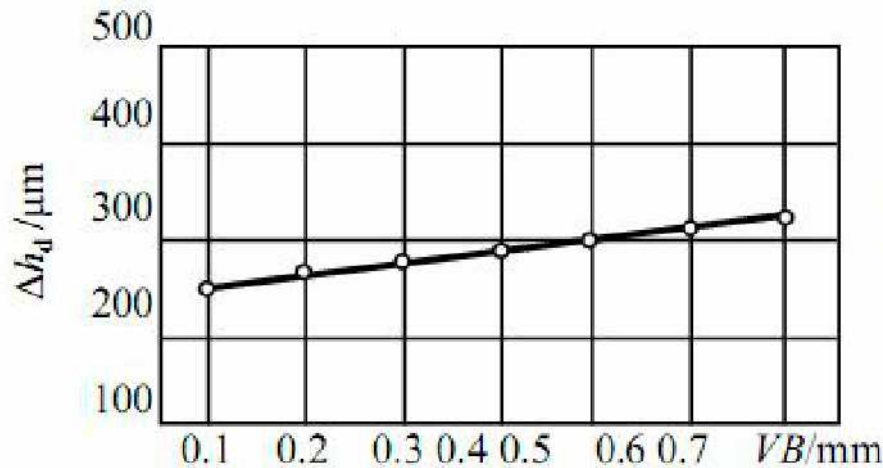
(2) 后角 α_0 越大， Δh_d 越小。

(3) 切削刃钝圆半径 r_n 越大，挤压与摩擦越严重， Δh_d 越大，如右上图所示。

(4) 刀具磨损量 VB 越大，后刀面与已加工表面的摩擦越大， Δh_d 越大，如右图所示。



$H-r_n$ 的关系曲线



$VB-\Delta h_d$ 的关系曲线

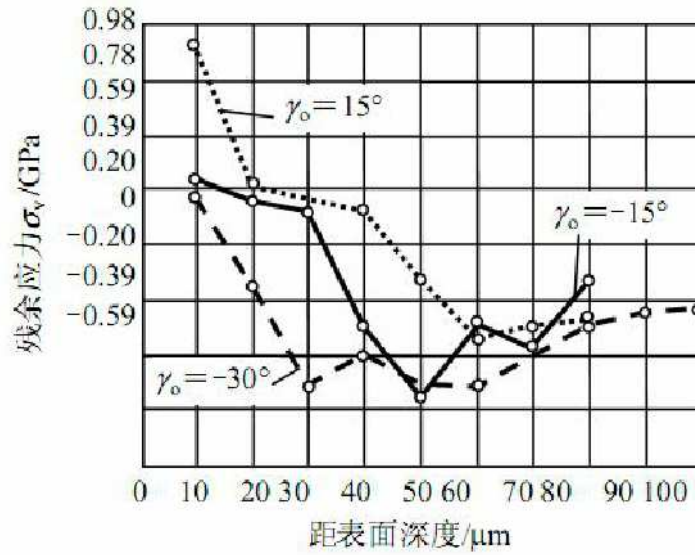
第四节 加工硬化

二 影响加工硬化的因素

3) 切削用量与切削液

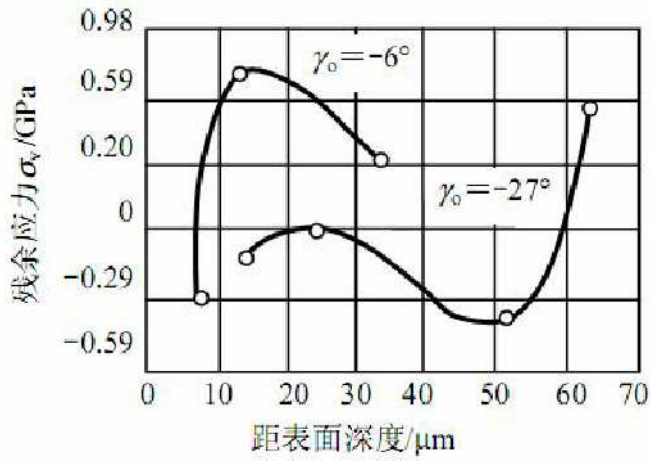
(1) 切削速度 v_c 越高硬化程度越小，但是增加到一定值后，硬化深度又增大，如图 3.83 所示。这是由于切削速度上升使金属的变形下降，后刀面与工件的接触时间减少，加工硬化不能充分进行，同时切削速度上升引起切削温度升高，弱化作用加强，这些都使加工硬化下降；当切削温度超过相变温度后已加工表面组织发生相变，如果遇到急速冷却，则形成淬火组织，使硬度上升。

第五节 残余应力



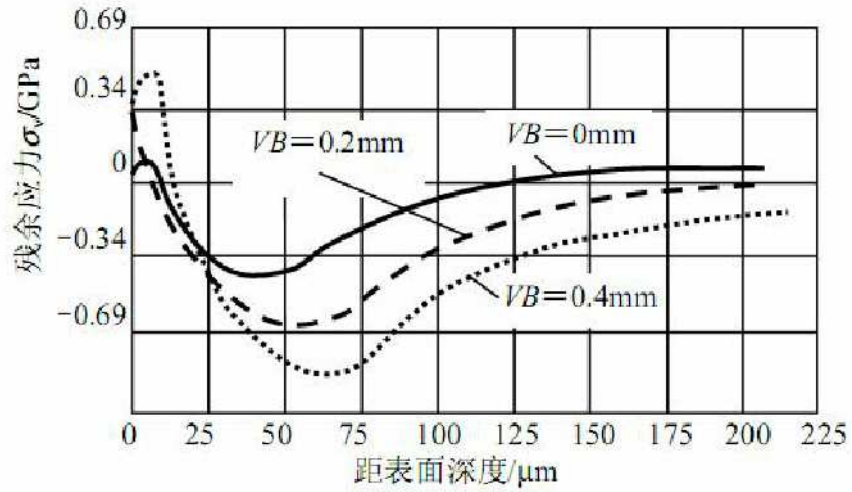
不同前角的刀具加工时工件表面的残余应力

第五节 残余应力



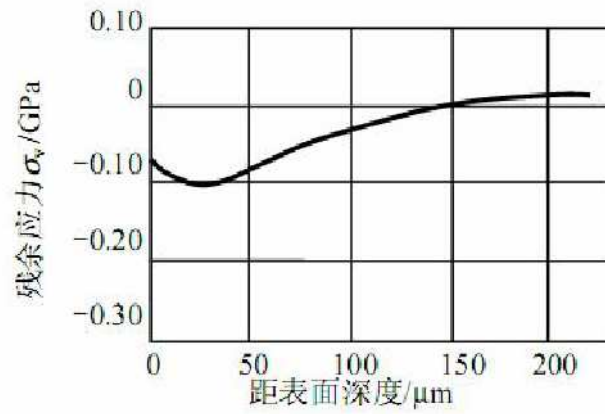
端铣时前角对残余应力的影响

第五节 残余应力



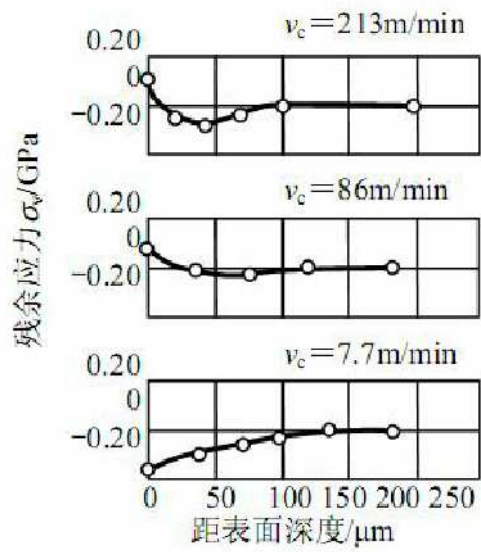
刀具磨损量对残余应力的影响

第五节 残余应力

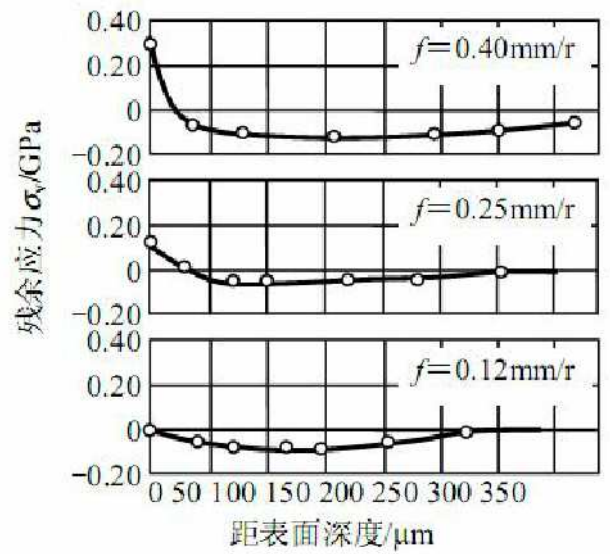


切削铸铁时加工表面的残余应力

第五节 残余应力

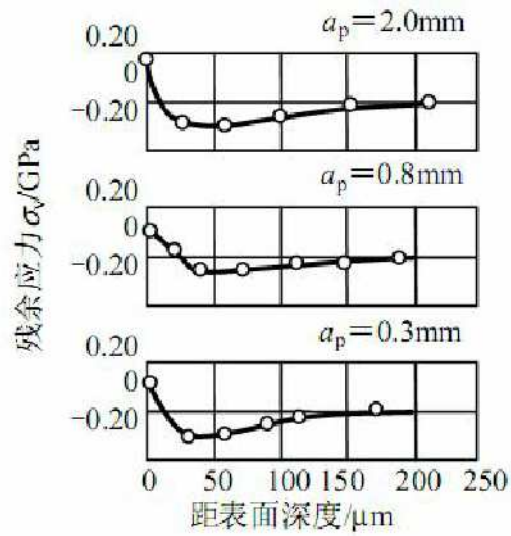


切削速度对残余应力的影响



进给量对残余应力的影响

第五节 残余应力



背吃刀量对残余应力的影响



复习思考题

1. 试述已加工表面的形成过程。
2. 已加工表面质量用什么衡量？
3. 何谓理论粗糙度？如何减小其值？
4. 何谓积屑瘤？形成的基本条件是什么？有何特点？对切削过程有何影响？如何抑制？
5. 何谓鳞刺？它是如何形成的？如何抑制？
6. 何谓加工硬化？如何表示？如何减小？
7. 何谓残余应力？产生原因有哪些？如何控制？