

# 机械加工误差

THE ERROR OF MACHINING



国防工业出版社

## 内 容 提 要

本书综述了有关的加工误差理论,详细论述了切削表面粗糙度、表面物理机械性能及提高表面质量的途径,论述了机床—工件—刀具工艺系统受热、受力变形产生的加工误差、误差计算和减少误差的途径。本书密切结合生产实际,阐明问题,论述系统、扼要、通俗易懂。

本书可供从事机器制造的工程技术人员、技师和具有一定实践经验的工人在分析、解决加工误差问题时参考,也可供大中专学生学习《机器制造工艺学》时参考。

## 机械加工误差

姜文奇 段佩玲 编著

\*

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

787×1092 1/32 印张 8<sup>3</sup>/<sub>4</sub> 189千字

1991年7月第一版 1991年7月第一次印刷 印数: 0,001—4,000册

---

ISBN 7-118-00783-8/TH·57 定价: 6.25元

## 前 言

1776 年出现第一台镗缸机, 所加工的第一台蒸汽机  $\phi 650$  毫米汽缸孔, 其直径尺寸的加工误差为一毫米左右。到本世纪 50 年代, 机器零件的加工误差达到了微米 ( $10^{-3}$  毫米) 级。自 50 年代末进入 70 年代以来, 由于航天、大规模集成电路、激光技术等尖端科学技术的发展和要求, 零件的加工误差已由微米级提高到今天的几十纳米级, 即从  $10^{-3}$  毫米提高到  $10^{-6}$  毫米, 使现代加工技术进入超精密加工的领域。

减少零件的加工误差, 提高零件的加工精度, 涉及到多门学科的发展。本书仅就常用刀具切削加工、磨削加工的误差理论作扼要介绍, 对于近年来发展的超精密加工、微细加工技术不作更多的论述。

若以控制 1 微米的加工尺寸误差为例, 首先要求刀具在最后一次切削时, 从工件表面切除的切削层厚度不能大于 1 微米, 这就对刀具材料、刀具的刃磨技术提出了更高的要求。要实现 1 微米的切削层厚度, 对于机床则要求具有精密的微进给机构, 进给的精度不能大于 1 微米。以车削或磨削外圆为例, 按机床误差为工件加工误差的  $1/2$  计算, 再以形状误差为尺寸误差的  $1/2$  考虑, 则机床的成形运动误差, 特别是主运动——工件或砂轮的旋转运动误差不能大于 0.25 微米。若进一步考虑切削过程其它因素的影响, 例如, 工艺系统受力、受热变形的数值, 在加工误差的敏感方向不能大

于 0.125 微米, 其他还有刀具的磨损、测量误差、工件的定位误差等等都必须严格控制, 这就涉及到相应技术的发展。自切削加工误差理论问世以来, 很多学者做了大量研究工作, 力图对加工误差作定量的分析计算, 但到目前为止, 由于切削过程的变化, 以及误差的影响因素较多, 定量计算很难与实际一致, 但作为定性分析是很有价值的。

本书综述了“互换性与技术测量”、“机床夹具设计”、“金属切削原理及刀具”、“金属切削机床”、“机器制造工艺学”等学科中有关加工误差的理论, 并按零件加工误差的表现形式, 即表面质量、尺寸、形状、位置误差分章进行了分析。鉴于工艺系统受力、受热变形对各项误差都有明显地影响, 故作为单独的章进行分析。

本书的编写, 是一种尝试, 希望能有利于读者较全面、系统地掌握机械加工误差的基本理论、基本知识, 为分析解决现场加工误差问题提供思路, 若能达到这一目的, 笔者将感到很大的欣慰。

由于水平有限, 书中有不妥之处, 敬请指出。

作者 于中南工业大学

# 目 录

|                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| <b>第一章 机械加工表面质量</b> .....      | <b>1</b>  |
| 1.1 已加工表面的形成机理 .....           | 1         |
| 1.1.1 刀具切削表面的形成机理 .....        | 1         |
| 1.1.2 磨粒加工表面的形成机理 .....        | 7         |
| 1.2 表面质量概念 .....               | 16        |
| 1.2.1 表面的几何形状特征 .....          | 17        |
| 1.2.2 已加工表面的物理机械性质 .....       | 18        |
| 1.3 刀具切削表面的粗糙度及其影响因素 .....     | 26        |
| 1.3.1 刀具切削表面粗糙度的产生 .....       | 26        |
| 1.3.2 影响切削表面粗糙度的因素 .....       | 37        |
| 1.4 磨削表面的粗糙度及其影响因素 .....       | 48        |
| 1.4.1 磨削表面的粗糙度 .....           | 48        |
| 1.4.2 影响磨削表面粗糙度的主要因素 .....     | 50        |
| 1.4.3 提高磨削表面精度的措施 .....        | 57        |
| 1.4.4 实现镜面磨削的条件 .....          | 67        |
| <b>第二章 工艺系统受热变形造成的误差</b> ..... | <b>69</b> |
| 2.1 切削热及其造成的误差 .....           | 70        |
| 2.1.1 切削热 .....                | 70        |
| 2.1.2 工件受热变形造成的误差 .....        | 78        |
| 2.1.3 刀具热变形造成的误差 .....         | 83        |
| 2.1.4 机床热变形造成的误差 .....         | 84        |
| 2.2 减少热变形的途径 .....             | 93        |
| 2.2.1 减少工艺系统的热变形 .....         | 93        |

|                                             |            |
|---------------------------------------------|------------|
| 2.2.2 均恒工艺系统的温度场 .....                      | 98         |
| <b>第三章 工艺系统的刚度及受力变形引起的误差 .....</b>          | <b>105</b> |
| 3.1 刚度的概念 .....                             | 105        |
| 3.1.1 静刚度 .....                             | 107        |
| 3.1.2 动刚度 .....                             | 110        |
| 3.1.3 接触刚度 .....                            | 110        |
| 3.2 工艺系统受力变形造成的误差 .....                     | 116        |
| 3.2.1 夹紧力造成的变形误差 .....                      | 116        |
| 3.2.2 切削力迫使工件变形引起的误差 .....                  | 121        |
| 3.2.3 切削力迫使刀具变形引起的误差 .....                  | 123        |
| 3.2.4 切削力迫使机床变形引起的误差 .....                  | 128        |
| 3.2.5 机床—工件—刀具—夹具工艺系统综合<br>变形对加工精度的影响 ..... | 131        |
| 3.2.6 减小工艺系统的受力变形的措施 .....                  | 140        |
| <b>第四章 尺寸误差 .....</b>                       | <b>146</b> |
| 4.1 尺寸误差的控制方法 .....                         | 146        |
| 4.1.1 试切法 .....                             | 146        |
| 4.1.2 定程法 .....                             | 147        |
| 4.1.3 自动控制法 .....                           | 150        |
| 4.1.4 定尺寸刀具法 .....                          | 151        |
| 4.2 尺寸测量误差 .....                            | 154        |
| 4.2.1 测量器具的误差及测具的选择 .....                   | 154        |
| 4.2.2 与测量过程有关的误差 .....                      | 155        |
| 4.3 切削工具制造、磨损引起的误差 .....                    | 158        |
| 4.3.1 切削刃圆弧半径与尺寸误差的关系 .....                 | 158        |
| 4.3.2 刀具磨损造成的误差 .....                       | 158        |
| 4.3.3 定尺寸刀具的加工误差 .....                      | 166        |
| 4.4 刀架、工作台的位移精度引起的定程误差 .....                | 168        |
| 4.4.1 定程误差的形式和产生原因 .....                    | 169        |

|            |                       |            |
|------------|-----------------------|------------|
| 4.4.2      | 提高位移精度的措施·····        | 172        |
| 4.5        | 机床传动误差引起的尺寸误差·····    | 176        |
| 4.5.1      | 传动件误差及其传递规律·····      | 176        |
| 4.5.2      | 提高传动精度的措施·····        | 180        |
| <b>第五章</b> | <b>形状误差</b> ·····     | <b>184</b> |
| 5.1        | 表面形状的获得方法·····        | 184        |
| 5.1.1      | 刀尖轨迹法·····            | 184        |
| 5.1.2      | 成形刀具法·····            | 186        |
| 5.1.3      | 展成法·····              | 187        |
| 5.2        | 形状误差概念·····           | 188        |
| 5.2.1      | 圆柱面的形状误差·····         | 188        |
| 5.2.2      | 平面的形状误差·····          | 189        |
| 5.2.3      | 任意轮廓面的形状误差·····       | 190        |
| 5.3        | 机床主轴的旋转误差造成的形状误差····· | 191        |
| 5.3.1      | 轴向漂移对形状误差的影响·····     | 192        |
| 5.3.2      | 径向漂移对形状误差的影响·····     | 193        |
| 5.3.3      | 角向漂移对形状误差的影响·····     | 193        |
| 5.3.4      | 提高机床主轴旋转精度的措施·····    | 194        |
| 5.4        | 进给运动的位移误差造成的形状误差····· | 201        |
| 5.4.1      | 导轨的直线度造成的形状误差·····    | 201        |
| 5.4.2      | 导轨的位置度造成的形状误差·····    | 204        |
| 5.5        | 工件内应力引起的形状误差·····     | 208        |
| <b>第六章</b> | <b>位置误差</b> ·····     | <b>211</b> |
| 6.1        | 被加工表面正确位置的获得方法·····   | 211        |
| 6.1.1      | 合理限制被加工工件的自由度·····    | 211        |
| 6.1.2      | 合理利用机床的几何精度·····      | 215        |
| 6.1.3      | 找正定位·····             | 224        |
| 6.1.4      | 利用夹具保证位置精度·····       | 227        |
| 6.2        | 位置误差的概念·····          | 230        |

## **Ⅶ**

|                           |            |
|---------------------------|------------|
| 6.2.1 定向误差·····           | 232        |
| 6.2.2 定位误差·····           | 233        |
| 6.2.3 跳动误差·····           | 234        |
| 6.3 影响位置精度的因素·····        | 236        |
| 6.3.1 平面定位误差·····         | 236        |
| 6.3.2 孔定位误差·····          | 238        |
| 6.3.3 孔面组合——一面两孔定位误差····· | 243        |
| 6.3.4 外圆柱面定位误差·····       | 246        |
| 6.3.5 基准不重合误差·····        | 249        |
| <b>第七章 加工误差的分析</b> ·····  | <b>252</b> |
| 7.1 系统性误差和随机性误差·····      | 252        |
| 7.1.1 系统性误差·····          | 253        |
| 7.1.2 随机性误差·····          | 253        |
| 7.2 误差的分析方法 ·····         | 254        |
| 7.2.1 分布图法·····           | 254        |
| 7.2.2 点图法·····            | 254        |
| 7.3 加工误差综合分析实例 ·····      | 262        |
| <b>参考文献</b> ·····         | <b>268</b> |

# 第一章 机械加工表面质量

## 1.1 已加工表面的形成机理

切削加工的目的，在于获得零件设计图上所要求的正确的几何形状，即具有规定的尺寸精度、形状精度、对基准的位置精度以及表面质量。为了达到这些要求，必须从零件的毛坯上切除多余的金属——余量。切除余量的主要方法有两大类：一是用刀具切削；一是用磨粒切削。切削所获得的表面状态与切削过程密切相关。因此，要掌握切削加工后的表面状态，必须研究金属的切削过程。

零件上多余的金属是怎样被切下来的呢？切削过程中将产生什么样的物理现象？这是首先要回答的问题。实验研究证明：金属切削过程，是被切金属层在具有切削运动（直线运动、旋转运动……）的刀具（或磨粒）的挤压、摩擦作用下，初始阶段迫使被切层产生弹性变形，最后产生塑性变形，进而转变为切屑和形成已加工表面的过程。下面分别论述刀具切削过程、磨粒切削过程及切削表面的形成。

### 1.1.1 刀具切削表面的形成机理

金属切削过程伴随着金属的变形过程。金属变形分为两种不同性质的变形，即弹性变形与塑性变形。

金属弹性变形——对没有内应力和未受外力作用的金属施加外力时，它将产生相应的变形（在材料的弹性极限内），当施加的外力去掉后，金属又恢复到原来形状的变形。这种

去除外力后能恢复的变形，就叫弹性变形。

金属塑性变形——金属受力变形超过材料的弹性极限后，即使去掉施加的外力，金属也不能恢复到受力前形状的变形。这种外力去除后不能恢复的变形，就叫塑性变形。

下面试用图 1-1 描述刀具切除金属的过程。

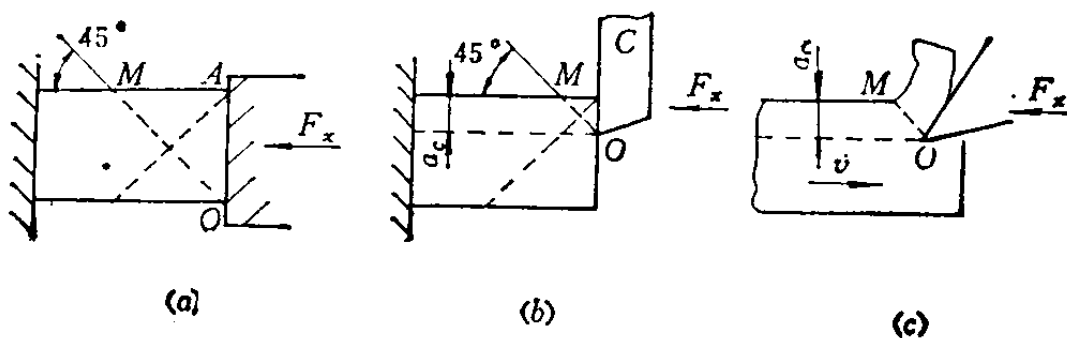


图1-1 金属切削过程

图 1-1 a 所示为作金属材料实验的情况。在试件的轴向由小到大施加一外力  $F_x$ ，在  $F_x$  力的作用下，试件在轴向开始产生弹性变形。随着外力的增大，变形加剧，当变形量超过材料的弹性极限时，试件即产生塑性变形。从金属的内部结构来看，当外力  $F_x$  增大到超过材料的极限剪切应力时，金属将沿结晶面产生滑移破坏，从滑移面  $OM$  方向 ( $45^\circ$ ) 产生塑性变形，从而将  $OMA$  一块金属从基体上挤切下来。分离面  $OM$  称为变形的剪切面。图 1-1 b 所示是模拟刀具切削的情况。以外力  $F_x$  通过压块  $C$ ，对试件的  $a_s$  层金属进行挤压，随着外力  $F_x$  的增大，受压层将在  $OM$  方向产生滑移塑性变形，而与基体分离。图 1-1 c 是用刀具切削  $a_s$  层金属的实验情况。当被切工件以速度  $v$  对刀具作相对运动时，刀具的前刀面对切削层  $a_s$  施加作用力  $F_x$ ，变形情况与前述试验相似，切削层将在  $OM$  面产生塑性变形，而脱离基体成

为切屑。当切削运动继续进行下去时，就形成一层一层的剪切面，好像一堆整齐的书倒向一边一样。

根据切削过程中切削金属层的变形情况，可将变形分为三个区域，即第Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ变形区，如图 1-2 所示。

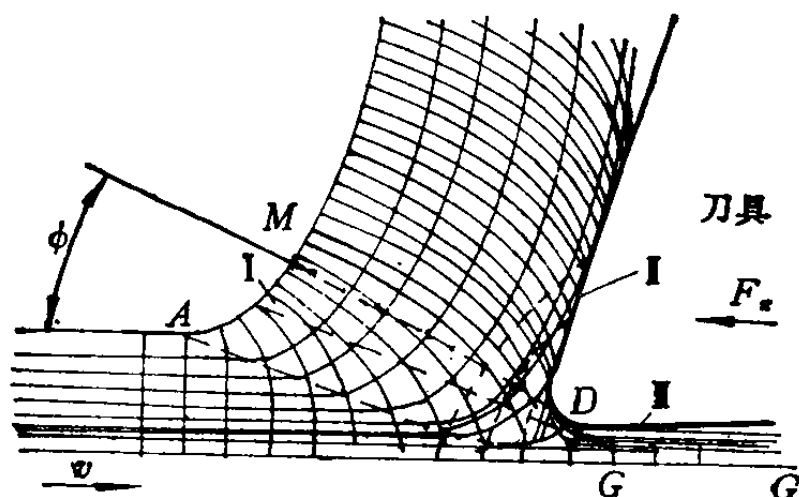


图1-2 切削过程三个区域的划分

### 第Ⅰ变形区——切屑形成变形区

在这一变形区内，切削层产生的塑性变形最大，其变形过程如下：在刀具切削力  $F_s$  的作用下，当切削力达到一定值时，沿  $OA$  线开始产生变形，即在此线上产生的切应力达到了被切金属屈服强度的数值，使被切层金属沿晶格开始产生了滑移。 $OM$  线表示塑性变形的结束，即在此线上应力和变形都达到最大值，使被切层金属离开基体而成为切屑。因此，切削过程，就是被切金属层在最大切应力作用下的剪切变形过程。根据测试，在一般切削速度范围内，第Ⅰ变形区的宽度仅为  $0.02 \sim 0.2\text{mm}$ ，是一个比较狭窄的断面层，在分析问题，可用剪切面  $OM$  来表示。剪切面  $OM$  与切削速度  $v$  方向的夹角称为剪切角，并以  $\phi$  表示。

### 第Ⅱ变形区——前刀面上的内摩擦区

被切削层金属，经过  $OM$  线后，变形并没有终止。在刀具前刀面的挤压作用下，切屑继续变形并沿前刀面排出。在此过程中，切屑底层与刀具前刀面之间，产生了强烈的摩擦，使切屑底层产生了摩擦变形；同时切屑底层受到刀具前面的摩擦阻力，其移动速度比切屑表层低，二者速度之差，使切屑进一步产生了塑性变形。此变形区约占切屑厚度的  $1/10 \sim 1/8$ 。若切屑厚度为  $1\text{ mm}$ ，则变形区厚约为  $0.1\text{ mm}$  左右。由于这一变形是由切屑底层与前刀面之间的摩擦引起，故称此区域为内摩擦区。

这里需要指出的是，在前刀面上内摩擦区范围内，当前刀面上的温度、压力达到一定值时，切屑底层的金属将粘附在前刀面上，形成积屑瘤。积屑瘤对切削过程有明显地影响。

### 第Ⅲ变形区——已加工表面变形区

金属切削层经第Ⅰ、Ⅱ变形区后，成为切屑被排除，留下来的就是已加工表面。因此，在这一区域内的变形过程，也是已加工表面的形成过程。

在图 1-2 中，已加工表面  $GG$  线以上的区域，即是已加工表面变形区（Ⅲ变形区）。它的变形过程直接关系到表面的状态——表面质量。

图 1-3 所示为已加工表面形成过程的示意图。图中以虚线表示三个变形区，以若干个长条  $DD$  的变形表示切削层金属，依次在第Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ变形区的变化。由图中看出，切削层金属在未进入第Ⅰ变形区以前， $DD$  条没有变化，当进入第Ⅰ变形区，则产生压缩、剪切变形。随着刀刃的逼近，变形加剧，其晶粒被压缩并越伸越长，成为细长的纤维而包住刀刃，最后在与刀刃接触的  $C$  点断开。 $C$  点以上的那部分

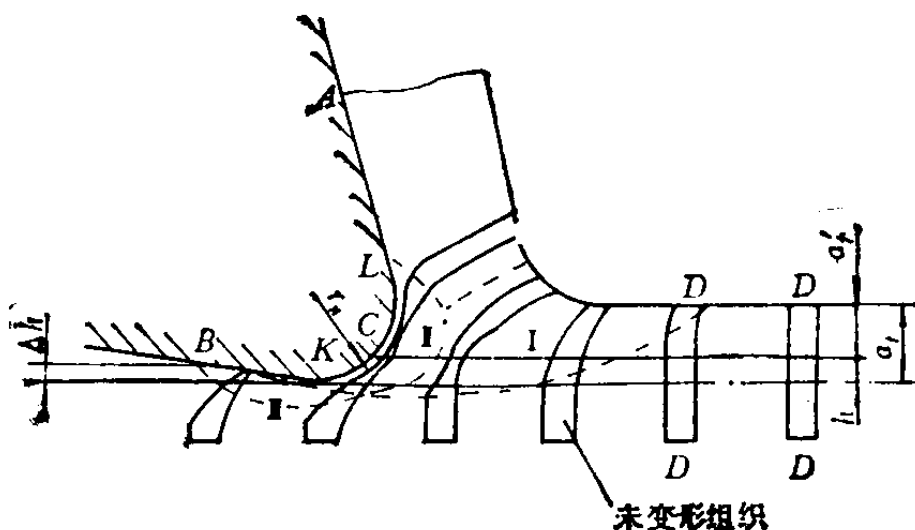


图1-3 已加工表面形成过程

沿前刀面经第Ⅰ变形区成为切屑，C点以下的那部分绕过刀具的后面而成为已加工表面。

由上述看出，已加工表面的形成过程主要有两方面：一是刀刃圆弧切离切屑后，对已加工表面的挤压变形；二是刀刃后刀面对已加工表面的摩擦变形。这两种变形，前者是主要的，它决定于刀刃的圆弧半径 $r_n$ 。假如刀刃是绝对锋利的，即圆弧半径 $r_n = 0$ ，则欲切除的切屑厚度 $a_p$ 将被全部切除；实际上 $r_n$ 不可能等于零，没有绝对锋利的刀刃，因此实际的切除厚度为 $a_p' = a_p - h$ 。 $h$ 层金属在刀刃圆弧作用下未被切除，熨压而过，使其产生很大的压缩变形后，缩小为 $\Delta h$ ，残留在表面上。在这一过程中，刀刃圆弧及后刀面对已加工表面施加一法向力和摩擦力。法向力的作用使已加工表面在径向产生弹、塑性变形；摩擦力的作用使已加工表面产生切向弹、塑性变形，从而使已加工表面强化和产生残余应力。已加工表面弹、塑性变形的大小，取决于切削后残

留量  $\Delta h$  的大小。 $\Delta h$  的大小，取决于刀刃圆弧半径  $r_n$ 。 $r_n$  大， $\Delta h$  即大； $r_n$  小， $\Delta h$  即小。当  $r_n$  较大，而切削深度  $a_p$  小到一定值时，如图 1-4 a 所示，则不产生切削作用，只对切削加工表面产生熨压作用。图 1-4 b 所示，当  $r_n = 0.01\text{mm}$  时，在  $a_p \leq 0.013\text{mm}$  时不产生切削作用，称此一段为熨压区；当  $a_p > 0.013\text{mm}$  时，产生切削作用，称为切削生成区。滚压强化工艺，就是利用对已加工表面的压熨作用产生强化的。

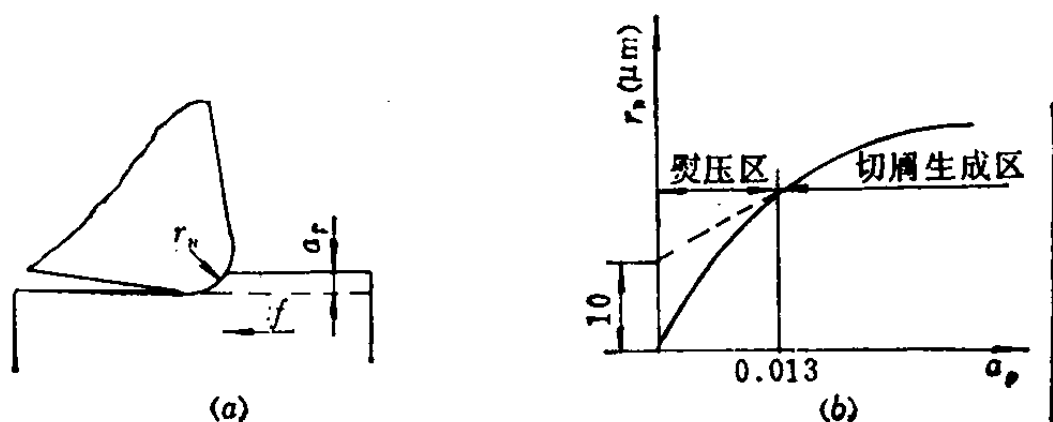


图1-4  $r_n$ 对切削过程的影响<sup>(2)</sup>

表 1-1 列出了用不同刃磨方法，磨削高速钢、硬质合金刀具时，所获得的刀刃圆弧半径  $r_n$ 、刀刃直线度和前、后刀面粗糙度的数值。根据试验测定，推荐  $r_n = 0.01\text{mm}$  比较恰当，因为  $r_n$  太小，刃口易损坏。

切削过程的三个变形区是依次进行的，并互相影响，特别是第 I 变形区，对第 II、III 变形区的影响更为突出。同时，切削过程中产生的各种物理现象（弹、塑性变形和热、力现象），几乎都与第 I 变形区的剪切滑移变形有关。

表1-1 由不同的刃磨方法所获得的刀刃状态<sup>〔2〕</sup>

| 高 速 钢 刀 具             |                                 |                                  |                                  |                                                              |                              |
|-----------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------|
|                       | 刀刃圆弧<br>半径<br>( $\mu\text{m}$ ) | 刀刃部分<br>直线度<br>( $\mu\text{m}$ ) | 刀具表面<br>平面度<br>( $\mu\text{m}$ ) | 磨削量<br>( $\text{mm}^3/$<br>( $\text{min}\cdot\text{cm}^2$ )) | 刀具表面<br>(一面)<br>的磨削时间<br>(s) |
| G. C. 砂轮              | 由于毛刺原因<br>测量困难                  |                                  | 2.5                              | 200                                                          | 60                           |
| Sarabin10—100T        | $5\sim 9\pm 1$                  | 12                               | 1.6                              | —                                                            | 120~150                      |
| 电解磨削 (通电,<br>金刚石砂轮)   | $7\pm 1.5$                      | 几乎为 0                            | 0.2                              | 100~180                                                      | 20                           |
| 电解磨削 (不通<br>电, 金刚石砂轮) | $2\pm 1.5$                      | 几乎为 0                            | 0.15                             | 140~160                                                      | 30                           |
| 金刚石砂轮                 | $5\pm 1$                        | 3                                | 0.6                              | —                                                            | 150                          |
| 硬 质 合 金 刀 具           |                                 |                                  |                                  |                                                              |                              |
| G. C. 砂轮 100          | 3.7                             | 6.3                              | 3                                | —                                                            | —                            |
| 金刚石砂轮 170/200         | 2                               | 0.8                              | 0.1                              | 20                                                           | 150                          |
| 金刚石砂轮 100/120         | 2                               | 1                                | 0.6                              | 45                                                           | 90                           |
| 电解磨削 (通电,<br>金刚石砂轮)   | 6                               | 几乎为 0                            | 0.15                             | 150~200                                                      | 20                           |
| 电解磨削 (不通电,<br>金刚石砂轮)  | 8                               | 几乎为 0                            | 0.1                              | 100~120                                                      | 30                           |

1.1.2 磨粒加工表面的形成机理

磨粒切削过程，是以具有极高硬度和强度的磨料颗粒作为刀具对金属材料进行切削的过程。在金属切削中，常用的磨料种类及其物理机械性能，如表 1-2 所示。

按磨粒实现切削的方法，可将磨粒切削分为两大类：

固定磨粒切削。如图 1-5 a 所示，磨粒被粘结剂粘结在一起，并构成一定的几何形状。磨粒靠高速旋转而获得动能，对金属进行切削。采用砂轮的各种磨削方法，采用油石进行切削的珩磨、超级加工，采用砂带的磨削等都属于固定磨粒切削的范畴。

表1-2 常用磨料的物理机械性能(3)

| 系别               | 名称及代号                | 主要成分                                                       | 显微硬度<br>(HV) | 极限抗弯强度<br>(GPa) | 密度<br>(g/cm³) | 研磨能力, 以金<br>刚石为1作比较 |
|------------------|----------------------|------------------------------------------------------------|--------------|-----------------|---------------|---------------------|
| 刚玉类              | 棕刚玉 GZ               | $Al_2O_3 > 95\%$ , $SiO_2 < 2\%$<br>$Fe_2O_3 < 1\%$        | 1800~2200    | 0.3677          | 3.95          | 0.10                |
|                  | 白刚玉 GB               | $Al_2O_3 > 98.5\%$ , $SiO_2 < 1.2\%$<br>$Fe_2O_3 < 0.15\%$ | 2200~2400    | 0.599           |               | 0.12                |
|                  | 单晶刚玉 GD              | $Al_2O_3 > 98\%$                                           | 2000~2400    |                 | 3.98          |                     |
|                  | 铬刚玉 GG               | $Al_2O_3 > 97.5\%$<br>$Cr_2O_3 \approx 1.5 \sim 2\%$       | 2200~2230    |                 | 3.98          | 0.13                |
| 碳化硅系             | 黑碳化硅 TH              | $SiC > 98.5\%$ , $C < 0.2\%$ ,<br>$Fe_2O_3 \leq 0.6\%$     | 3100~3280    | 0.155           | 3.2           | 0.25                |
|                  | 绿碳化硅 TL              | $SiC > 99\%$ , $C < 0.2\%$ ,<br>$Fe_2O_3 \leq 0.2\%$       | 3200~3400    | 0.155           | 3.2           | 0.28                |
| 碳化硼及<br>碳化硅硼     | 碳化硼 TP               | $B_4C = 96\%$ 左右                                           | 4000~5000    |                 | 2.5           | 0.30                |
|                  | 碳硅硼 TGP              | $B > 36\%$ , $Si > 27\%$ ,<br>$C > 25\%$                   | 5700~6200    |                 | 2.7~2.8       | 0.33                |
| 金石<br>刚系         | 金刚石 人造,<br>JR 天然, JT | C                                                          | 10060~11000  | 0.33~3.38       | 3.52          | 1.0                 |
| 立方氮化硼<br>(简称CBN) |                      | 以六方氮化硼为原料, 使用金<br>属触媒剂, 在高温高压下合成                           | 7300~10000   | 1.155           | 3.48          | 0.80                |

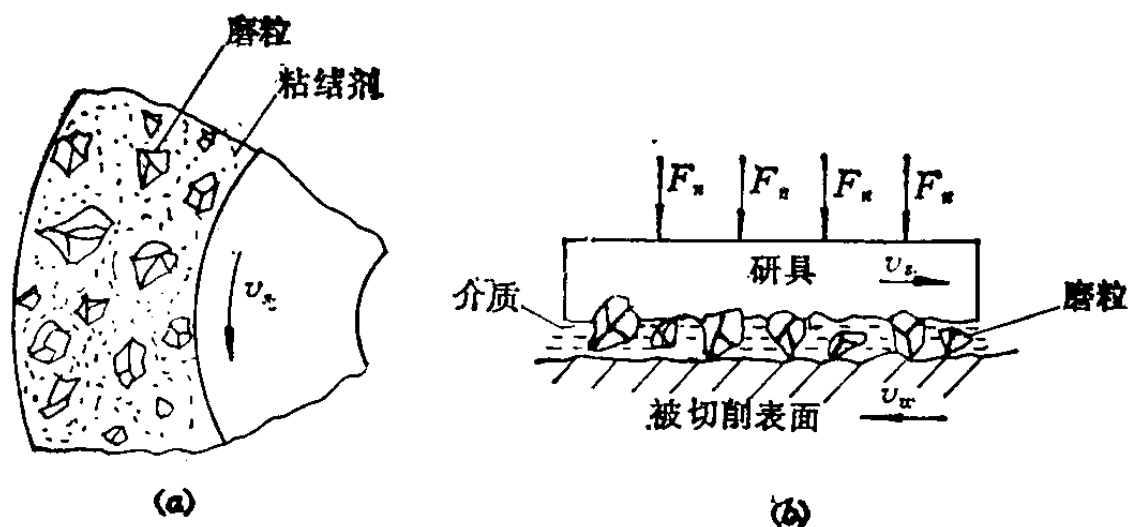


图1-5 磨粒切削

游离磨粒切削。磨粒游离在液体介质中，位置随时都在变化。磨粒的切削作用靠两种方法来实现：

(1) 磨粒位于研具和被切削表面之间，如图 1-5 b 所示。通过研具向磨粒施加一定的法向压力  $F_n$ ，由于研具的材料较软，磨粒一方面嵌入研具，一方面切入工件表面，研具与工件表面相对运动，使磨粒获得切削运动。当切削阻力较大时，磨粒将脱离研具而重新嵌入，再进行切削。因此，磨粒在切削过程中，位置在不断的改变。在生产中，各种形式的研磨就属于这种方法。

(2) 采用某种装置，使磨粒获得相当的运动速度，以其获得的动能进行切削。喷砂加工，即是其中的一种方法。以流体（气体或液体）作为介质，使磨粒获得较高的加速度，冲击切削表面实现切削。其它的方法，如使用软布，浸渍研磨膏抛光，磨粒在振动液体中，获得往复运动对被加工表面进行抛光；将磨粒、液体、工件置于滚筒内，滚筒以适当的