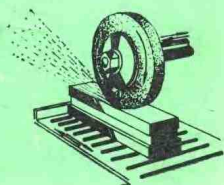


磨削原理与工艺

傅杰才 主编



湖南大学出版社

内 容 提 要

本书是适应机制专业本科生选修课和磨削研究方向硕士研究生必修学位课程的需要,在1981、1983及1985年湖南大学《磨削原理与工艺》讲义的基础上,根据多年教学经验,进行修改和充实而编成的。

全书包括:磨削过程及主要磨削参数,磨削机理,磨削加工质量及磨削表面的工艺性,高速磨削,强力磨削,非砂轮磨削,磨削经济性、优化及适应控制,现阶段磨削工艺在实际生产中存在的主要问题及展望等八章,并附有磨削原理实验的指导书。本书对磨削的基本原理、新的磨削工艺方法及有关磨削工艺的发展存在的主要问题和远景,根据国内、外研究的现状,作了比较系统和深入的阐述。内容新颖,取材适当,理论联系实际,可供高校机制工艺及设备专业师生和有关工程技术人员、科研工作者使用。

磨 削 原 理 与 工 艺

傅杰才 主编

☆

湖南大学出版社出版 湖南省新华书店发行

湖南大学印刷厂印刷

☆

开本: 787×1092 1/16 印张: 12.125 字数: 280千字

1986年8月第一版 1986年8月第一次印刷

印数: 0001—3000册

统一书号: 15412·17 定价: 2.90元

前 言

本教材系根据机械制造工艺及设备专业本科学生开设选修课程和该专业磨削方向硕士研究生开设学位必修课程的要求而编写的。编者总结了多年的教学经验,在1981、1983、1985年编印的教学讲义基础上,于1985年6月~1986年3月进行了全面修改,更新和充实了部分内容,使其更好地反映了磨削理论研究的现状。

本书内容新颖简要,基本上都可作为课堂讲授的内容,可作高等工科院校机械制造工艺及设备专业本科学生的选修课程和磨削研究方向硕士研究生的学位必修课程的教材(包括实验约3学分,60学时),也可供从事磨削工作的科技人员参考。

本书由湖南大学机械制造教研室有关教师集体编写,由傅杰才同志主编。参加编写的人员及所编章节为:第一章、第四章、第五章、第六章、第八章——傅杰才,第二章——傅杰才、孙宗禹、周志雄、第三章——傅杰才、周志雄,第七章——孙宗禹,附录——周志雄。

本书由湖南大学出版社出版,出版社左宗仰同志在编审工作中对本书提出了很多修改和补充意见;出版社刘凤祥、机械系杨惠庄同志为本书绘图,对提高本书质量作了很大的贡献,谨此致谢。

对本书不足之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

1986年3月

目 录

前 言

第一章 磨削过程和主要磨削参数..... (1)

§ 1—1 磨削过程..... (1)

§ 1—2 磨削过程的主要条件..... (5)

§ 1—3 磨削过程的主要参数..... (6)

第二章 磨削机理..... (9)

§ 2—1 磨削过程中的弹性变形与砂轮工件的接触弧长..... (9)

§ 2—2 磨削过程中的磨削力..... (16)

§ 2—3 磨削过程中的磨削热与磨削温度..... (24)

§ 2—4 磨削过程中的振动..... (37)

§ 2—5 磨削过程中的砂轮磨损..... (45)

§ 2—6 磨削过程中的砂轮修整..... (48)

§ 2—7 磨削液..... (58)

第三章 磨削加工质量及磨削表面的工艺性..... (73)

§ 3—1 磨削加工的精度..... (73)

§ 3—2 磨削表面的粗糙度..... (78)

§ 3—3 磨削表面的残余应力..... (83)

§ 3—4 磨削表面的烧伤及裂纹..... (93)

§ 3—5 磨削表面的工艺性..... (97)

第四章 高速磨削..... (99)

§ 4—1 高速磨削的应用和发展概况..... (99)

§ 4—2 高速磨削机理..... (100)

§ 4—3 高速磨削的砂轮..... (100)

§ 4—4 高速磨削对机床的要求..... (105)

§ 4—5 高速磨削用量的合理选择..... (107)

§ 4—6 高速磨削应用实例..... (109)

第五章 强力磨削..... (114)

§ 5—1 概述..... (114)

§ 5—2 蜗动进给磨削的几个问题..... (115)

第六章 非砂轮磨削	(124)
§ 6—1 珩磨.....	(124)
§ 6—2 砂带磨削.....	(128)
§ 6—3 研磨.....	(135)
第七章 磨削加工的经济性、优化和适应控制	(138)
§ 7—1 磨削加工成本和生产率的分析计算.....	(138)
§ 7—2 磨削参数的优化.....	(149)
§ 7—3 磨削加工的适应控制.....	(157)
第八章 现阶段磨削工艺在实际生产中存在的主要问题及展望	(169)
§ 8—1 概述.....	(169)
§ 8—2 磨削工艺现阶段的情况.....	(169)
§ 8—3 今后工厂中发展磨削工艺将遇到的问题.....	(171)
附 录 磨削原理及磨削工艺实验指导书	(173)
实验一 磨削温度的测量.....	(173)
实验二 磨削力的测量.....	(179)
实验三 磨削接触弧长的测量.....	(184)
主要参考文献	(189)

第一章 磨削过程和主要磨削参数

§1-1 磨削过程

一 磨粒的磨削过程

磨削是由磨床、砂轮、工件形成的一种切削加工工艺，其过程比较复杂，但本质上是用磨粒进行的切削过程，而砂轮上的磨粒则支承在具有弹性的结合剂上。由于磨粒切削刃的切削深度非常小，且切削刃具有负前角，在磨削时工艺系统产生弹性变形的影响下，磨粒在和工件接触时产生后退而在工件表面上滑擦或使工件表面产生塑性变形，只有在切削深度达到某一临界值时才开始进行切削。

图1—1表示一个磨粒的切削过程。 EP 段中，由于切削深度极小，磨粒刃尖圆弧形成的实际负前角很大，磨粒仅在工件表面上滑擦而过，所引起的变形完全弹性恢复，在工件表面不残留任何沟痕，称为弹性区。 PC 段中，随着磨粒挤入工件深度的增大，磨粒与工件表面间的压力逐步增加，工件表面由弹性变形逐步过渡到塑性变形。这时挤压摩擦剧烈，热应力急剧增加，磨粒在工件表面上挤压刻划出沟痕，沟痕的两侧由于金属塑性滑移而隆起，称为耕犁区。

当挤入深度继续增加到某一定值（ C 点处）时，被推挤的金属明显地滑移并形成切屑而从前刀面流出，形成切削区。因此，磨粒切削刃的作用包括滑擦（ EP 段）、耕犁（ PC 段）和切削（ C 以后）三个形态，根据切削深度的不同，三个形态的比例也是变化的。

除了可用显微镜观察来区分磨粒切削过程的三种形态外，还可以从切削深度和磨削力关系的图形上根据曲线斜率的转折点来判断，即转折点对应于形态的变化点。图1—2系切入磨削时的例子，根据图中曲线的斜率，可清楚地区分三个形态的区间。一般从耕犁形

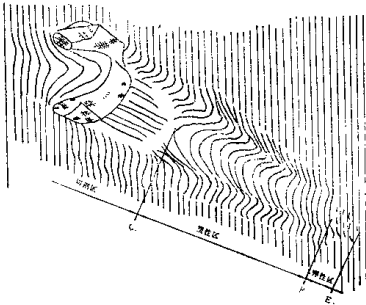


图1—1 磨粒的切削过程

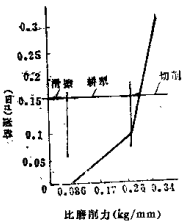


图1—2 根据切深和比磨削力关系曲线斜率中的转折点区分磨削过程三种形态

态转变到切削形态的开始，切削深度受切削刃磨钝程度的影响，大约在 $0.1 \sim 2\mu\text{m}$ 内变化。

理想的砂轮，其磨粒切削刃数在砂轮的圆周方向和轴线方向是均匀分布的，但在磨削深度方向（砂轮的径向），由于对磨粒磨损、脱落、修整情况的认识不一致以及测试方法的不同，所以对磨粒切削刃数提出了相等、正态、抛物线、正三角形、反三角形等不同的分布情况(图1—3)。

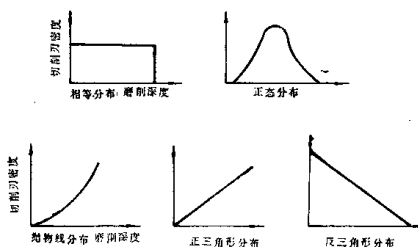


图1—3 磨粒切削刃数在磨削深度方向的分布

常用的砂轮每单位体积(mm^3)约有磨粒 $60 \sim 120$ 颗。磨粒的形状近似于圆锥形，圆锥角通常约为 106° 。

磨削过程中，由于磨粒在磨削深度方向位置的不同，露出的磨粒只有一部分参加切削。据统计，当磨削深度为 $10\mu\text{m}$ 时，砂轮最外层的磨粒100%参加切削，比外层低 $2\mu\text{m}$ 的磨粒，就只有80%左右参加切削，比外层低 $6\mu\text{m}$ 的磨粒，就几乎不参加切削了。参加切削的磨粒称为有效磨粒；参加切削的切削刃称为有效切削刃。由于一颗磨粒破碎后可以形成许多个切削刃，所以砂轮的磨粒数并不等于切削刃数，有效磨粒数也不等于有效切削刃数。

二 砂轮的磨削过程

由于用砂轮作定进给量切入外圆磨削是一种比较简单的磨削过程，而对研究其它各种磨削过程又有一定的代表意义，故用它作为研究磨削过程的一种典型的磨削方式。

定进给量切入外圆磨削的一个循环通常由起火花切入、稳定磨削和去火花清磨这三个阶段组成(图1—4)。在图中O是砂轮和工件之间的开始接触点。由于工艺系统的弹性位移，在砂轮和工件刚开始接触后，工件和砂轮因在法向磨削力 F_n 的作用下产生径向位移，并没有真正形成磨削而使工件的尺寸减小，此时的尺寸形成量为零。O₁是尺寸形成的开始点，从这点开始，砂轮才磨削工件，使工件尺寸开始减小。在图中以线ONG

代表砂轮磨削表面的理论位移量 $d(t)$ ，由于砂轮磨损的影响，砂轮磨削表面的实际位移量 $d'(t)$ 比理论位移小，故可以用 ON'/G' 代表。若考虑磨削时工艺系统弹性变形产生的位移量和残留余量，则 $O.SF.F$ 是代表工件半径减小的尺寸形成曲线。

在定进给量切入外圆磨削时，砂轮架的理论进给速度 V_p 通常比较小。这样，在切入外圆磨削的初始阶段，由于砂轮和工件间的干涉深度非常小，在时间 t 内有切削作用的磨粒和被磨工件表面之间仅仅是弹性接触而不会切除金属，此时时间内的尺寸形成速度 $\dot{R}(t)$ 为零。因为砂轮架总是以一定的速度 V_p 向前进给，砂轮和工件之间的干涉深度则随着磨削时间的积累而增加。从 t_e 开始，砂轮开始切削工件，但效率很低，实际是磨粒对工件起耕犁作用，沿磨粒路径的两侧有材料隆起，而且还有一部分隆起的材料将被砂轮撕裂带走，这时尺寸形成速度 $\dot{R}(t)$ 是比较小的。磨削时间更长，即在 $t_e \sim t_s$ 期间的后一阶段，砂轮和工件的干涉深度更大，每颗有效磨粒都能够产生切屑，此时的尺寸形成速度 $\dot{R}(t)$ 就较大了。但是，在 $t_e \sim t_s$ 这个磨削阶段中，因为尺寸形成速度 $\dot{R}(t)$ 仍然小于砂轮架的理论进给速度 V_p ，所以砂轮的干涉深度是变化的，即仍随着磨削时间的积累而增加。当砂轮和工件的干涉深度变得大大超过砂轮的理論切削深度时，尺寸形成速度 $\dot{R}(t)$ 和砂轮有效进给速度 V'_p 才相等，而 V'_p 等于砂轮架的理论进给速度 V_p 和平均砂轮磨损速度 C_0 之差。这样，在 $t_s \sim t_f$ 时间内将形成一个稳定的磨削阶段，即此时砂轮和工件的干涉深度为定值。当砂轮在 t_f 停止进给而进行去火花清磨时，由于工艺系统的弹性恢复，工艺系统弹性位移和残留余量组成的积累量减小，虽然随着清磨时间的延长，切除了余量，使尺寸形成量 $R(t)$ 增加，但尺寸形成速度 $\dot{R}(t)$ 却随着清磨时间的增加而减小。磨削工艺系统的积累量甚至在去火花清磨结束时也不为零。

磨削时的积累现象也与在一个磨削循环中磨削力的变化有密切关系。即在起火花切入阶段，因为磨削系统积累量的增加，磨削力随着磨削时间加长而增加。在稳定磨削阶段，因为磨削系统积累量为常数，磨削力也为常数。而在去火花清磨阶段，因为磨削系统积累量逐渐减小，磨削力则随着清磨时间加长而减小。但因去火花清磨时总有残留积累量存在，故磨削力也一直不会减小至零，而在去火花清磨一段时间后保持为某一常数。

图1—4及上面叙述中的有关符号，分别说明如下：

- t_e ——空磨时间，(s)；
- t_s ——起火花切入时间，(s)；
- t_f ——去火花清磨时间，(s)；

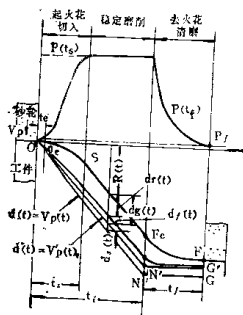


图1—4 定进给量切入外圆磨削循环

t_i ——砂轮进给时间, (s);
 $d_s(t)$ ——砂轮磨损量, (mm);
 $d_f(t)$ ——工艺系统的弹性位移量, (mm);
 $d_r(t)$ ——残留余量, (mm);
 $d_o(t) = d_f(t) + d_r(t)$ ——工艺系统积累量, (mm);
 $R(t)$ ——尺寸形成量 (工件半径减小量), (mm)。

进行纵向外圆磨削时, 砂轮与工件之间除在一定的磨削深度下作相对转动外, 还需在砂轮宽度方向上作相对运动。图1—5是纵向外圆磨削机理的模式图。假如把砂轮

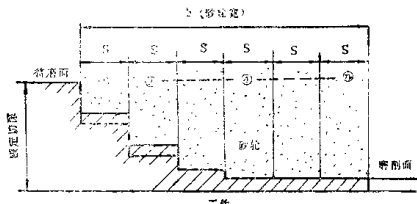


图1—5 纵向外圆磨削机理模式

宽度 b 的 $\frac{1}{n}$ 作为工件每转时砂轮在其宽度方向上对于工件的相对运动量, 即纵向进给量, 从砂轮前端开始, 把砂轮工作面等分为①、②…… n 段, 砂轮从第①段开始磨削工件, 第②段磨削第①段的磨削残余部分, ……当最后第 n 段磨削后, 就形成了所要求的磨削面。在这种情况下, 属于同一段的砂轮工作面, 虽然它的位置不同, 但起的磨削作用是相同的; 不属于同一段的砂轮, 其磨削余量、砂轮磨损量等都不相同, 所起的磨削作用也不相同。首先, 在砂轮磨损较小的初期磨损阶段, 第①段大约磨去总余量的 80%, 第②段约磨去余量 10% 以上, 而第④段以后的砂轮工作面则基本不磨除余量, 故工件半径没有减小, 只是减小了加工表面的粗糙度参数值。但是当磨削进行到某一程度时, 由于磨削力大部分集中于第①段, 因而第①段的砂轮磨损增大, 切削量减少, 从而使第②段的磨削量增大。继续进行磨削时, 将使第②段的砂轮磨损增大, 磨削量也因此减小, 从而导致第③段的磨削量增多。如此继续下去, 砂轮的磨损从前侧逐渐移向后侧 (即砂轮产生主要磨削作用的部分逐渐由前侧移向后侧), 当最多磨削量变得由砂轮最后一段承担时, 该段砂轮的工作面已不能起减小加工表面粗糙度参数值的作用, 而只能起切除金属的作用了, 这时便需要修整砂轮。在纵向外圆磨削过程中砂轮相对于工件作往复运动进行磨削时, 每一方向的运动都使砂轮的不同侧面起主要磨削作用, 而砂轮中间部分的作用则在于减小加工表面的粗糙度参数值。

如上所述, 纵向外圆磨削时, 在砂轮宽度方向位置上砂轮各段的磨削作用各不相同, 并随磨削时间的变化而变化, 因而使磨削过程更趋复杂, 所以至今还未能确定纵向外圆磨削过程的基本模型。

§1—2 磨削过程的主要条件

通常,影响磨削过程效率和成本的主要因素是尺寸误差、几何形状误差、相互位置误差、表面粗糙度及表面完整性的劣化等。为了减少或消除磨削过程中的这些不利因素并寻找其规律,就必须研究磨削加工过程中的输入条件与输出条件以及它们之间的相互关系。

磨削加工中的输入条件(即对磨削过程有影响的条件)是:工具(砂轮)、被磨材料、相对运动、干涉、机床和氛围;输出条件(即磨削结果)是:磨削效率、加工精度、表面质量和作业环境等。其中:

工具条件包括:磨料的种类、形状及粒度;结合剂的种类、数量;砂轮的形状、尺寸、性质、不平衡量、组织情况;砂轮的修整条件等。磨削时由于砂轮锐利性系数的分散性,工具的条件是变化的,即使把砂轮种类和修整条件等都作了具体的规定,也不能将工具条件看成是确定的。

被磨材料的条件是:材料的种类及物理机械性能;加工部分的尺寸、形状、加工余量及加工误差等。

相对运动的条件是:砂轮的转速和工件的转速。

干涉条件是:砂轮的进给量、砂轮与工件的速比和砂轮的当量直径。

机床条件是:磨床的静刚度、动刚度(固有频率、衰减特性等)、热刚度、运动特

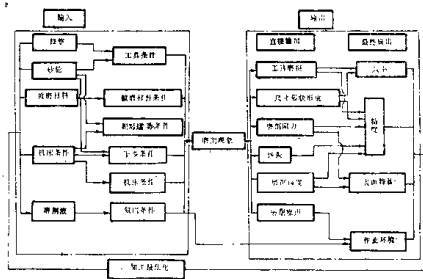


图1—6 磨削输入与输出条件的关系

性（定位精度、砂轮和工件轴心线的回转精度）等。

氛围条件是：磨削液的种类（冷却润滑能力、物理化学性质）喷射量及喷射压力等。

输入条件产生磨削现象，使工件形成新的表面、尺寸和形态，随之而产生砂轮磨损、磨削阻力、颤振、磨削温度、磨削噪声等直接输出，从而决定了最终的磨削输出——磨削效率、磨削精度、表面特性和作业环境等。上述这些因素的相互关系如图1—6所示。

§1—3 磨削过程的主要参数

为了研究磨削加工过程的输入与输出条件以及它们之间的相互关系，除了要了解一些我们已知的常用磨削参数外，还必须更深入地对某些基本磨削参数进行探讨，亦即对磨削机理进行更深入的探讨。

在进行磨削加工时，砂轮与工件接触，互相加工。砂轮以比切除率 Z'_w 切削工件，而工件也以比切除率 Z'_s 切削砂轮。通常，在进行正常磨削时， Z'_w 远远大于 Z'_s 。从比切除率对单位磨削宽度上的界面法向力（界面强度） F'_s 之间的关系曲线（图1—7）也可清楚地看出磨削时的规律。在图上呈现了滑擦区（到负荷临界点 F'_{s0} ）、耕犁区（到 F'_{s0} ，亦即到由耕犁向切削转变之点）和切削区。在耕犁区和切削区内，金属比切除率 Z'_s 对界面强度 F'_s 的关系曲线的斜率分别用 λ_w （金属耕犁参数）和 λ_{wc} （金属切削参数）表示。

图1—7中的曲线 Z'_s 表明了工件是如何“加工”砂轮的（即砂轮是如何磨损）的。从图中可以看出，砂轮的磨损曲线大约在 2.68 kg/mm 处突然上升，该处即是砂轮的“破坏强度” F'_{s0} ，也就是砂轮的磨损极限。砂轮磨损曲线是一条低于破坏强度的近似直线，其斜率用 λ_s 表示，它是砂轮的磨损参数，也可称为砂轮切削参数。

从图1—7中还可看出在切削区中 Z'_w 、 Z'_s 与界面强度之间为线性关系。故有：

$$\text{工件比磨除力} \quad Z'_w = \lambda_{wc}(F'_s - F'_{fc}) \quad (1-1)$$

$$\text{砂轮比磨除率} \quad Z'_s = \lambda_s F'_s \quad (1-2)$$

$$\text{同时又有} \quad Z'_w = \pi \cdot d_w \bar{V}_w \quad (1-3)$$

$$Z'_s = \pi \cdot d_s \bar{V}_s \quad (1-4)$$

式中： $\bar{V}_w$ ——砂轮切入工件的平均速度(mm/s)；

$\bar{V}_s$ ——工件切入砂轮的平均速度(mm/s)。

故磨削时工件的切削方程式，可写成下列两种形式：

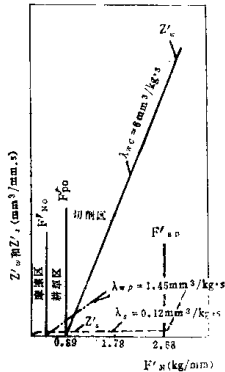


图1—7 比切除率对界面强度之关系

$$\overline{V}_w = \frac{\lambda_{wc}(F'_{ns} - F'_{rc})}{\pi d_w} \quad (1-5)$$

此式适用于已知磨削力的适应控制磨削。

或
$$F'_{ns} - F'_{rc} = \frac{\pi d_w \overline{V}_w}{\lambda_{wc}} \quad (1-6)$$

此式适用于已知进给速度的适应控制磨削。

而砂轮被工件切削的方程式为：

$$\overline{V}_s = \frac{\lambda_s F'_{ns}}{\pi d_s} \quad (1-7)$$

砂轮与工件开始接触的瞬间，工件棱边嵌入砂轮，产生较大的局部负荷。如果这局部负荷超过砂轮的破坏强度 F'_{ns} ，砂轮将发生局部磨损而损坏廓形，从而导致工件宏观轮廓恶化。此时的局部负荷 F'_{ns} 可通过下式求得：

$$F'_{ns} = \frac{\pi d_w \overline{V}_w}{\lambda_{wc}} + F'_{rc} \quad (1-8)$$

砂轮与工件接触时，使局部负荷等于但不大于破坏强度的最大进给速度 $\overline{V}_{wmax}$ ，可令 $F'_{ns} = F'_{ns}$ ，用下式求出：

$$\overline{V}_{wmax} = \frac{\lambda_{wc}(F'_{ns} - F'_{rc})}{\pi d_w} \quad (1-9)$$

故通过图1-7，可用图解形式表示磨削加工的许多情况，这对研究高速、高效率磨削具有很大的参考价值。

在某些场合下，可把复杂多端的磨削输入条件形式化，用定量的磨削特征值来表示，这样便可控制磨削过程，确定磨削模型，预测磨削输出（结果）。

影响磨削特性的另一个重要参数是砂轮与工件的适应性。适应性的程度可用砂轮的当量直径 D_e 来表示。即当外圆或内圆磨削时，若磨削深度、砂轮与工件的接触弧长和用砂轮圆周作平面磨削时的数值相等时，则此平面磨削时的砂轮直径称为砂轮的当量直径。可用下式表示

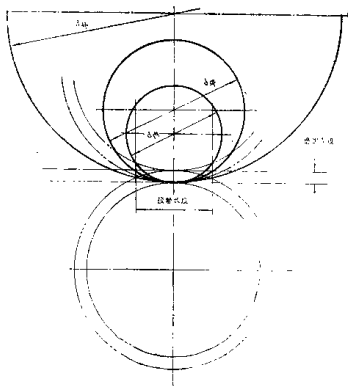


图1-8 砂轮的当量直径

$$D_e = \frac{d_w d_s}{d_w \pm d_s} \quad (1-10)$$

外圆磨削时式中的分母用正号，内圆磨削时式中的分母用负号。

由图 1—8 可见，当外圆磨削的磨削深度和砂轮工件的接触弧长度与平面磨削相等时，平面磨削的砂轮比外圆磨削的砂轮直径小，即外圆磨削时砂轮的当量直径比实际直径小；而内圆磨削的磨削深度和砂轮工件的接触弧长度与平面磨削相等时，平面磨削的砂轮比内圆磨削的砂轮直径大，故内圆磨削时砂轮的当量直径比实际直径大。

在磨削加工时，因为系用存在于砂轮表面层的磨粒切削刀来进行切削，所以单颗磨粒的磨粒切深 g 比砂轮磨削深度 a 更为重要。

在图 1—9 所示的外圆切入磨削中，当第一个磨粒切削刀 X 离开工件后，具有间距为 M (即 $\overline{XY}$ ，叫做连续磨粒切削刀间距) 的下一个磨粒切削刀 Y 要离开工件的瞬间，才由 Y 产生磨屑，其断面形状如图 1—9 中的阴影部分 $PBUCR$ 所示，此时将 RU 叫做最大磨粒切深 (g_m)，可用下式表示：

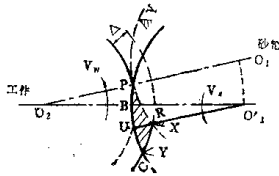


图 1—9 磨屑断面形状及磨粒切深

$$g_m = 2M \left(\frac{V_w}{V_s} \right) \left(\frac{d_w \pm d_s}{d_w d_s} \right)^{0.5} a^{0.5} = 2M \left(\frac{V_w}{V_s} \right) \sqrt{\frac{a}{D_c}} \quad (1-21)$$

PBUC 叫做磨粒和工件的接触弧长 L ，以下式表示：

$$L = \sqrt{D_c a} \quad (1-12)$$

磨削时影响工件表面完整性的主要因素是过热，过热受到下列基本因素的影响，如：工件速度 V_w 、砂轮速度 V_s 、砂轮磨削深度 a 、磨粒切削深度 g 、界面强度 F'_w 、砂轮当量直径 D_c 、砂轮锐利性 S 和磨削液的使用情况等等。在这些基本因素中最容易被人忽视的是砂轮锐利性 S ，它可以用金属切削参数 λ_{wc} 与砂轮圆周速度 V_s 之比来表示，即：

$$S = \frac{\lambda_{wc}}{V_s} \quad (1-13)$$

砂轮锐利性 S 代表在某一瞬间每单位法向力下砂轮切削被磨材料的有效面积，这一参数是控制工件表面完整性的一个重要因素。

第二章 磨削机理

§2-1 磨削过程中的弹性变形与砂轮工件的接触弧长

一、磨削过程中的弹性变形

磨削过程中, 砂轮和工件两个弹性体受到力的作用, 使砂轮和工件接触区域产生了弹性变形。它不仅对被磨削表面的尺寸精度有极其重要的影响, 而且, 增加了砂轮与工件之间的接触弧长, 因此增加了有效切削刃数和磨削时所需要的能量, 从而对磨削热也产生了一定的影响; 它还使砂轮上的许多磨粒只在工件表面产生滑擦而不切除余量, 这就增加了磨粒的磨耗磨损, 因此缩短了砂轮的寿命。然而, 砂轮和工件之间的局部弹性变形, 在降低工件尺寸精度的前提下, 将减少被磨工件的表面粗糙度参数, 这一点对精密磨削的影响尤为显著。因此, 国内外对磨削过程中的弹性变形这个课题进行了大量的研究。

磨削过程中砂轮和工件间的弹性变形, 可以从微观和宏观两方面来观察。微观地看, 砂轮的磨粒在切除切屑时产生弹性变形的原因是由于有法向磨削力作用于磨粒上(图2-1)。

宏观地看, 可以认为砂轮是其圆柱面部分压向被磨材料表面, 并从这个表面磨除材料。

Hahn 是第一个研究磨削时陶瓷砂轮的磨粒产生弹性变形的人, 他设计了一个简单的磨粒弹性变形的模型; 该模型系将磨粒装在一个独立的弹簧上。他认为当磨削力保持不变时, 材料切除率的不同是由于砂轮和工件之间接触面的曲率不同引起的。由于在接触区域中磨粒的弹性变形影响磨削时接触区域的有效磨粒数, 因而影响了材料的切除率。一般说来, 砂轮和工件接触表面的曲率差愈大, 每单位砂轮面积上的有效磨粒数愈多, 材料的切除率也就愈高。

Peklenik 应用专门的热电偶技术, 发现不同硬度的砂轮具有不同的有效磨粒数, 他认为这是由于砂轮的弹性率不同所造成的。他还注意到砂轮和工件的速度也对有效的磨粒空间产生影响, 这是由于砂轮和工件速度的变化, 加于磨粒上的磨削力也随之产生了变化, 因此影响了接触区域内磨粒的弹性变形, 从而影响了有效的磨粒空间。

Brown、Saito和Shaw则利用局部磨削技术 (the patch grinding techniques) 定量地研究了磨削过程中的弹性变形。他们把弹性变形分为两类:

1. 假设磨粒所在的砂轮表面形状保持为一个圆时, 磨粒——工件的弹性变形。
3. 假设单颗磨粒不产生弹性变形时, 砂轮——工件间的接触变形。

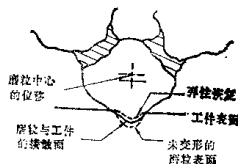


图2-1 磨粒上由于法向磨削力的作用而产生弹性变形

然后, 综合这两种变形, 就得到了砂轮——工件间的总变形。如图2—2a、b、c所示。

Nakayama 则利用多向测力仪测量了磨粒——工件接触区的弹性变形。其他一些日本学者对磨削过程中单颗磨粒的弹性变形及磨削点附近的弹性变形, 也进行了广泛的探讨, 发表了不少有关的专题论文。

近年来, 除了采用上述方法研究磨削过程的弹性变形外, 还出现了用全息干涉摄影技术来测量以及用有限元法来分析计算磨削过程中的弹性变形等方法。

二、磨削时砂轮——工件的接触弧长

人们在研究磨削过程中砂轮——工件的弹性变形时, 都要研究砂轮——工件的接触弧长, 通过对接触弧长的研究来证明在磨削过程中它们之间产生的弹性变形及由此而产生的后果。此外, 还由于接触弧的长度就等于磨削时热源的长度, 所以它也对磨削区域的温度及磨削区域工件表面下的温度分布产生影响, 进而影响被加工工件表面的完整性。可见, 磨削接触弧长与磨削过程的各影响参数是密切相关的, 它是磨削过程中一个极其重要的参数。因此国内外学者都十分重视对它的研究, 从理论及实验等方面进行了广泛的分析探讨, 发表了不少有关的专题论文。

对磨削接触弧长研究的早期, 人们视砂轮和工件为两个绝对刚体, 如图2—3所示。由此用

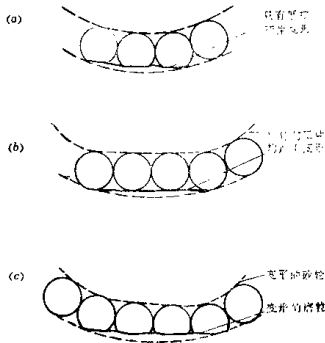


图2—2 a) 磨粒——工件间的弹性变形
b) 砂轮——工件间的接触变形
c) 砂轮——工件间的总变形

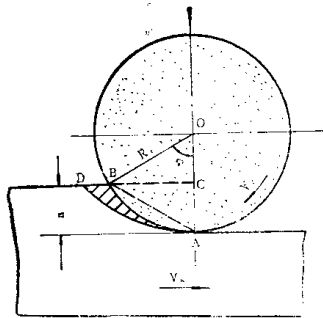


图2—3 早期的砂轮——工件接触模型

几何算法可推出砂轮——工件的接触弧长：

$$L_1 = \sqrt{aD_s} \quad (2-1)$$

式中： L_1 ——几何计算所得的接触弧长 (mm)；

a ——磨削深度 (mm)；

D_s ——砂轮当量直径 (mm)；

通过几何计算，还可推得内圆磨削及外圆磨削情况下与式 (2-1) 相同的砂轮与工件接触弧长的表达式。

随着理论研究的深入发展，人们逐步认识到由于弹性变形的影响，砂轮、工件间的接触弧长比理想的接触弧长加长了，如图2—4所示。国内外所作的研究结果表明，实际接触弧长与理想接触弧长之比约为 1.15~2。结果相差较大，这可能是由于各种研究中使用的方法各异而造成的。

1971 年 Brown 等人利用局部磨削技术，在研究砂轮——工件的弹性变形时，也研究了它们的接触弧长，并得出了接触弧长的计算式。

1974 年，W. J. Sauer 和 M. C. Shaw 利用机械式快停装置，测量研究了砂轮——工件的接触弧长。

1977 年，Brown 等人利用爆炸式快停装置对平面磨削过程中的砂轮与工件干涉区进行了研究。并测得了变形后砂轮——工件的接触长度比没有弹性变形时的几何接触长度长 50%。

1980 年，K. V. Kumar 和 M. C. Shaw 在忽略磨削热作用的影响下，利用图2—5所示的磨粒团块过切飞磨法和快速脱离装置，测量了磨削时砂轮和工件之间的实际接触弧长。当一片如图2—5所示的砂轮用于切入平面磨削（没有横向进给）时，将产生 3.2 mm 宽的一条断续槽。因为工作台速度远比砂轮速度小，并且由于快速脱离装置的作用，使砂轮在很短的时间内与工件脱离，然后再利用轮廓仪测量出这一痕迹的长度 L 。根据实验结果，他们认为在接触表面变形时，砂轮的

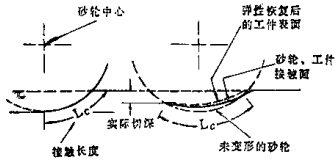


图2—4 工件和砂轮产生了变形时的接触弧长

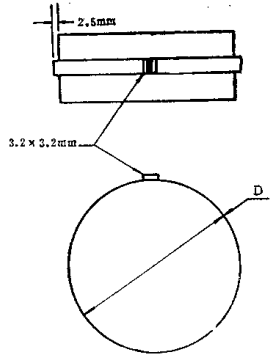


图2—5 磨粒团块过切飞磨法示意图

局部变形对接触弧长的影响比工件局部变形的影响更大。

在这一试验的基础上，他们还从理论上得到了平面磨削时具有局部变形的砂轮——工件间接触弧长 L 的数学模型，即：

$$L = \left(1 + \frac{0.095(1+\nu)F_n d_s}{\sqrt{d_s a} b E_s a} \right)^{\frac{1}{2}} [d_s a]^{\frac{1}{2}} \tag{2-2}$$

式中：

L ——砂轮具有局部弹性变形的理论接触弧长度 (mm)；

d_s ——刚性砂轮直径 (mm)；

a ——测量得到的砂轮切削深度 (mm)；

b ——砂轮宽度 (mm)；

E_s ——砂轮的弹性模量 (kg/mm²)；

ν ——砂轮的泊松比；

F_n ——砂轮所受到的法向磨削力 (kg)。

Peklenik 的热电偶法是国内外较为流行的一种动态测温法，国内外许多学者除用它研究磨削温度、砂轮和工件的弹性变形外，也利用它测量了磨削时砂轮与工件的接触弧长。用这种方法测量时，接触弧长实际上是通过固定点（如热电偶）移动的距离（即此点开始和砂轮表面接触到接触终止所移动的距离）来决定的。它与固定点的移动速度以及此固定点和砂轮表面接触的时间有关，如图2—6所示。而此点与砂轮的接触是通过热电偶与磨粒的接触来体现的，如图2—7所示。因此，只要保证热电偶与磨粒摩擦（即形成稳定热电偶）就能产生脉冲信号。将此信号记录下来，即可求得信号所持续的时间 τ ，从而由下式求得接触弧长：

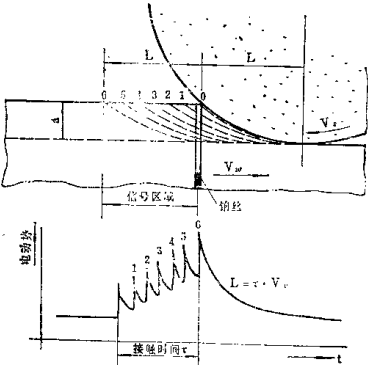


图2—6 用热电偶测量接触弧长的原理图

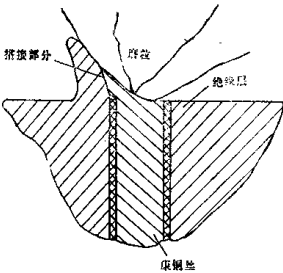


图2—7 磨粒磨过热电丝与工件的情况