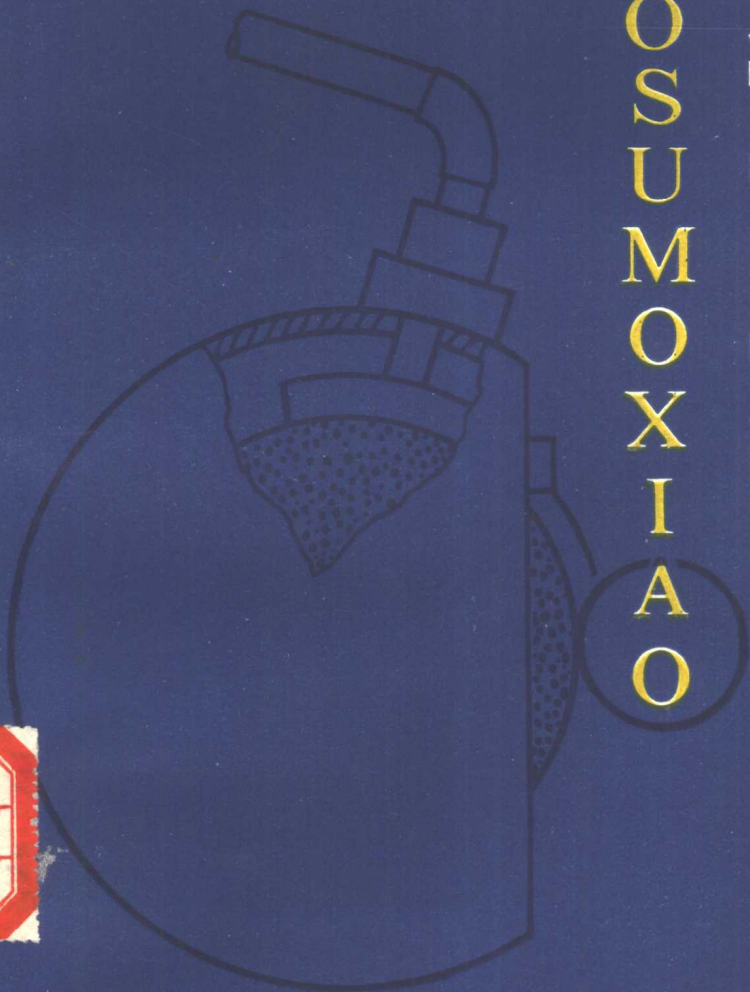


高速磨削

GAOSUMOXIAO

刘蒲生等编



高 速 磨 削

刘蒲生 等编



机 械 工 业 出 版 社

本书共分四章。第一章就高速磨削的切除层、磨削力、磨削表面粗糙度、磨削温度、砂轮磨钝磨损及耐用度等基本理论问题作了简要介绍；第二章和第三章介绍了高速磨削工艺参数及砂轮特性的选择；第四章总结了高速磨削对机床的要求，并介绍了一些普通磨床如何进行高速磨削改装的经验。最后在附录中还介绍了我国自行设计制造的几种高速磨床的主要技术规格及其结构特点。

本书可供从事磨削加工的技术人员和具有一定技术水平的磨工在推广和应用高速磨削时参考。

高速磨削

刘蒲生等 编

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

北京市西城区丰盛印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $5 \frac{7}{8}$ · 字数 126 千字

1982年11月北京第一版·1982年11月北京第一次印刷

印数 0,001—8,400 · 定价 0.56 元

*

统一书号：15033·5320

前 言

高速磨削是提高磨削效率的重要途径之一。所谓高速磨削，从广义上说是指砂轮速度高于 35米/秒 的磨削加工方法。本书所说的高速磨削是指砂轮速度高于 50米/秒 的精密磨削。这时，磨削已不仅仅是传统概念中的精整加工方法，而开始成为与其他切削加工方法相抗衡的金属切除手段。现在，在加工某些工件时，高速磨削已成功地取代了车削、铣削和刨削，效率既不低于这些加工方法，同时又可以使工件达到较高的精度和光洁度。这就为少切削加工方法的发展提供了条件。

实际应用表明，广泛推广、应用 $50\sim 60\text{米/秒}$ 高速磨削技术不仅是完全可能的，而且是十分必要的。为此，我们总结了国内在高速磨削的试验研究和推广应用中的经验编成此书，供从事磨削加工的技术人员和工人参考。

本书在编写过程中得到郑州磨料磨具磨削研究所、上海机床厂磨床研究所、第二砂轮厂、华中工学院、湖南大学、浙江大学、东北工学院等单位有关同志的帮助和指导，在此表示感谢。

本书第一章、第二章、第三章第四节由刘蒲生执笔编写，第三章的其他各节由马文信执笔编写，第四章及附录由柴菊娣执笔编写。由于编者的技术水平所限，收集的资料亦不全面，错误和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

主要符号及其名称

- v_s 砂轮速度 (米/秒)
- n_s 砂轮转速 (转/分)
- v_w 工件速度 (米/分)
- n_w 工件转速 (转/分)
- q 速比——砂轮速度与工件速度之比 (v_s/v_w)
- v_f 砂轮进给速度 (毫米/分)
- Δ 工件每转砂轮的切入进给量 (毫米/转)
- s 纵进给速度 (毫米/分)
- u 工件每转 (工作台) 纵向进给量 (毫米/转)
- t 纵进给时的吃刀深度 (毫米/行程)
- $D_s (R_s)$ 砂轮直径 (半径) (毫米)
- $d_w (r_w)$ 工件直径 (半径) (毫米)
- ΔR_s 砂轮半径磨损量 (微米)
- Z 单位时间金属切除量 (厘米³/分)
- Z' 金属切除率 (毫米³/毫米·秒)
- \bar{Z}' 在耐用度期间的平均金属切除率 (毫米³/毫米·秒)
- Q 在耐用度期间内切除的金属总体积 (厘米³)
- Q' 金属总切除量 (毫米³/毫米)
- T 砂轮耐用度——两次修整之间的总磨削时间 (秒)
- τ 磨削时间 (秒)
- R_a 工件表面粗糙度或工件表面不平度 (微米)
- G 磨削比——磨去的金属体积与砂轮磨损体积之比
- R_{as} 砂轮表面粗糙度 (微米)
- N_e 磨削功率 (千瓦)
- U 比能量——磨去单位体积的金属所消耗的能量 (公斤·米/毫米³)

- F 总磨削力 (公斤力)
 F_n 法向磨削力 (公斤力)
 F_t 切向磨削力 (公斤力)
 B 砂轮磨削宽度 (毫米)
 F'_n 法向磨削力强度——单位磨削宽度上的法向磨削力 (公斤力/毫米)
 F'_t 切向磨削力强度——单位磨削宽度上的切向磨削力 (公斤力/毫米)
 λ 金属切削性能系数 (金属切除参数——在单位磨削力作用下单位时间内切除的金属体积 (毫米³/公斤力·秒)
 a_{max} 每颗磨粒切去的最大未变形切屑厚度 (毫米)
 l 砂轮表面相邻两个磨粒的距离 (毫米)
 L 未变形切屑长度或接触弧长 (毫米)
 θ 磨削温度 (°C)
 $\Delta\theta$ 工件磨削表面温升 (°C)
 h_{max} 磨削温度的示值高度 (毫米)
 l_d 修整导程——砂轮每转金刚石的移动距离 (毫米/转)
 s_d 修整速度 (毫米/分)
 t_d 修整深度 (毫米/行程)
 H_d 修整层厚度——每次修整时切去的砂轮厚度 (毫米)
 j 工艺系统刚度 (公斤力/微米)

目 录

| | | |
|------------|------------------------------|------------|
| 第一章 | 高速磨削技术基础 | 1 |
| 第一节 | 高速磨削时磨粒的最大未变形切屑厚度和切屑长度 | 1 |
| 第二节 | 高速磨削时的磨削力 | 7 |
| 第三节 | 高速磨削时的磨削温度 | 15 |
| 第四节 | 高速磨削时的工件表面粗糙度 | 20 |
| 第五节 | 高速磨削时砂轮的磨钝和磨损 | 26 |
| 第六节 | 高速磨削时的砂轮耐用度 | 31 |
| 第二章 | 高速磨削的工艺参数 | 36 |
| 第一节 | 高速外圆磨削用量的选择 | 36 |
| 第二节 | 高速磨削时的砂轮修整 | 47 |
| 第三节 | 高速磨削时的冷却方法和冷却液的选择 | 61 |
| 第四节 | 工艺系统刚度对高速磨削性能的影响 | 81 |
| 第五节 | 高速磨削时的两个特例 | 85 |
| 第三章 | 高速砂轮及其特性的选择 | 98 |
| 第一节 | 关于高速砂轮的强度 | 98 |
| 第二节 | 提高砂轮强度的方法 | 101 |
| 第三节 | 高速砂轮的安全系数、不平衡重量及孔径 | 105 |
| 第四节 | 高速砂轮特性的选择 | 109 |
| 第四章 | 高速磨削机床 | 116 |
| 第一节 | 高速磨削对机床的要求及机床改进措施 | 116 |
| 第二节 | 普通磨床的高速改装实例 | 141 |
| 第三节 | 高速磨削的安全操作要求 | 171 |
| 附录 | 国产高速磨床介绍 | 173 |
| | 主要参考文献 | 177 |

第一章 高速磨削技术基础

磨削是由大量的、具有很高硬度的磨粒在一定的固结状态下，以很高的速度对被加工零件表面进行微细切削的一种加工方法。

在磨削过程中，作为切削工具的砂轮是以极高的速度对工件表面进行切削的。普通磨削时，砂轮速度一般为35米/秒，比一般车削速度高出十倍以上；而高速磨削时，砂轮速度则达到50~120米/秒或者更高，这是高速磨削不同于一般金属切削加工，也不同于一般普通磨削的重要特点。

由于砂轮速度的提高，将使磨削过程产生一系列的变化，从而对磨削生产率和加工质量等产生重大影响。而提高砂轮速度正是研究高速磨削的主要内容。这里，我们先就磨削过程中的一些基本规律，诸如：磨粒的切屑厚度和切屑长度、磨削力、磨削表面粗糙度、磨削温度、砂轮磨钝磨损及耐用度等几个方面与砂轮速度的关系进行一些简要的分析，使我们对高速磨削的特点有一个理性上的认识。

第一节 高速磨削时磨粒的最大未变形切屑厚度和切屑长度

磨削时，磨粒切削刃是实现切削的基本要素之一，研究磨粒切削工件时的切屑厚度和切屑长度及其对磨削过程的影响，对于揭示磨削过程的物理本质具有十分重要的意义。

在磨削过程中，砂轮工作表面上有许多磨粒（切削刃）参加切削，起切削作用的磨粒零乱地、无规则地分布在砂轮体内，有高有低，前后位置上有的磨粒对着前面的磨粒，有的磨粒则对着前面的空隙，因此，各个磨粒切削工件时的切除层形状是很不相同的。如果磨粒正好切在前一个磨粒切过的切痕中，则切除层的形状就象图 1-1 a 中的阴影形状；如果切到完全没有切过的地方，就得到图 1-1 b 所示的切除层形状；其他一些磨粒则可能遇到图 1-1 c 或 d 所表示的切除层形状。

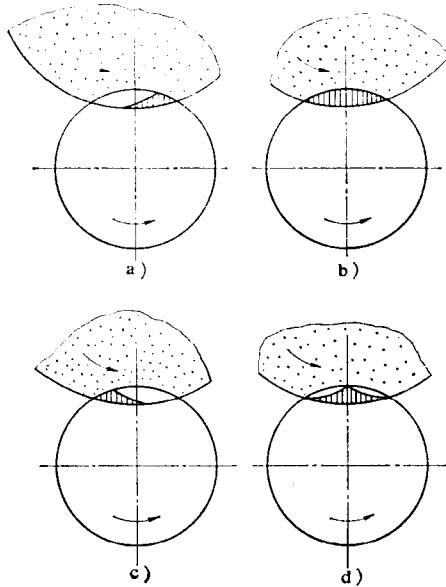


图1-1 磨削时，各种可能的切除层形状

为了便于分析，我们假定磨粒前后对齐，均匀分布在砂轮的外圆表面上，这时，单个磨粒的切除层形状就是图 1-1 a 中的阴影部分所表示的样子。下面我们就这种切层性质的性质作一些分析。

一、磨粒最大未变形切屑厚度

图 1-2 所示为外圆切入磨削时的运动关系。图中 U_H 即为磨粒的最大未变形切屑厚度 $a_{m \max}$ 。由图可知：

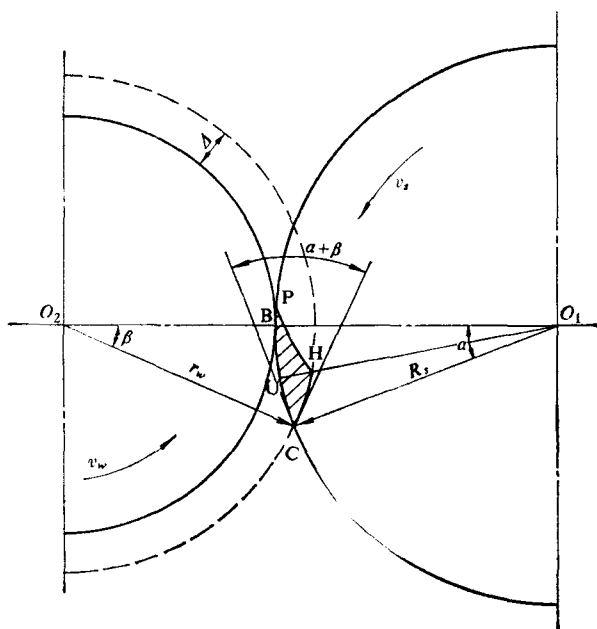


图1-2 单个磨粒的最大切屑厚度

$$a_{\max} = UH \approx \widehat{CH} \sin(\alpha + \beta) \quad (1-1)$$

\widehat{CH} 为相邻两磨粒在工件上切削的长度，工件旋转一周的时间为： $\tau = \frac{\pi d_w}{v_w}$ 。在此时间内，砂轮表面一点走过的距离为： $\tau v_s = \frac{v_s}{v_w} \times \pi d_w$ 。设相邻两个磨粒的距离为 l ，则此时通过工件的磨粒数目 \bar{m} 为：

$$\bar{m} = \frac{\tau v_s}{l} = \frac{v_s}{v_w} \times \frac{\pi d_w}{l} \quad (1-2)$$

这样，相邻两颗磨粒在工件上切削的长度 \widehat{CH} 为：

$$\widehat{CH} = \frac{\pi d_w}{\bar{m}} = \pi d_w \times \frac{l}{\pi d_w} \times \frac{v_w}{v_s} = l \times \frac{v_w}{v_s} \quad (1-3)$$

而

$$\sin(\alpha + \beta) = 2\sqrt{\frac{\Delta(D_s + d_w)}{D_s d_w}} \quad (1-4)$$

将式 (1-3) 和式 (1-4) 代入式 (1-1), 则:

$$a_{\max} = 2l \times \frac{v_w}{v_s} \sqrt{\frac{\Delta(D_s + d_w)}{D_s d_w}} \quad (1-5)$$

二、未变形切屑长度

切屑长度是切屑形状的另一重要参数。在图 1-2 所示的外圆磨削情况下, \widehat{PBC} 即为最大未变形切屑长度 L , 从图可以看出:

$$L = \widehat{PBC} = \widehat{BC} + \widehat{PB} \approx R \sqrt{\frac{2r_w \Delta}{R_s(R_s + r_w)}} + l \frac{v_w}{v_s} \quad (1-6)$$

$$\Delta = \frac{v_f}{n_w} \quad (\text{毫米/转}) \quad (1-7)$$

从上述关于磨粒最大未变形切屑厚度和切屑长度的几何关系分析, 提高砂轮速度对磨削过程将产生下述影响:

(1) 由式 (1-5) 可见, 在其他条件不变时, 提高砂轮速度 v_s , 则每颗磨粒切下的最大切屑厚度 a_{\max} 减小。这是由于提高砂轮速度以后, 单位时间内通过磨削区域的磨粒数增加, 在其他条件不变时, 分配在每颗磨粒切削刃切去的切屑厚度自然要减小。

(2) 磨粒最大切屑厚度与工件每转砂轮切入进给量 Δ 的平方根成比例, 即进给速度增加时, 切屑厚度也增加。如果保持高速磨削时每颗磨粒切去的最大切屑厚度与普通磨削时的切屑厚度相同, 则高速磨削时的进给量可以大大增加。砂轮速度增加一倍, 则最大切屑厚度 a_{\max} 相应减小一半。如

果此时使切屑厚度保持不变，则工件每转砂轮切入进给量可增加到四倍，因而磨削效率大大提高。也就是说，单单提高砂轮速度，只能改善工件加工精度和表面光洁度，提高砂轮耐用度，而磨削效率的提高不显著；只有在提高砂轮速度的同时，也提高砂轮的进给速度或吃刀深度，才能大幅度提高磨削效率。

(3) 关于工件速度 v_w 对切屑厚度 a_{max} 的影响，不能从式(1-5)直接看出来，因为工件速度 v_w 与工件每转砂轮的切入进给量 Δ 不是独立的变量，由式(1-7)可以看出：当砂轮进给速度 v_f 一定时，对于一定直径的工件来说，随着工件转速 n_w 增加，工件每转砂轮进给量 Δ 减小。因此，工件速度增加时，虽有使切屑厚度增加的趋势，但工件每转砂轮切入进给量 Δ 减小，又有使切屑厚度减小的趋势。这种关系可从图 1-3 看出：当工件速度增加时，对切屑厚度的影响很小。

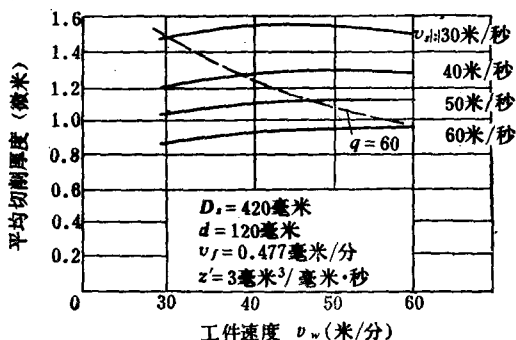


图1-3 工件速度与切屑厚度的关系^[2]

(4) 式(1-6)所示的切屑长度，也可以看成是砂轮与工件的接触弧长。由此式看出：砂轮速度 v_s 增加，接触

弧长缩短，工件速度 v_w 增加，接触弧长有可能增加，但进给量 Δ 却因工件速度 v_w 的增加而减小，又可能使接触弧长减小。但总的来说，式 (1-6) 中第二项远比第一项的值小，所以，砂轮速度和工件速度对切屑长度的影响不大。

砂轮速度提高后，磨削 45 号钢时，基本形状是带状的 (图 1-4 a)，也有熔结成球状和逗点状的；而普通磨削 ($v_s = 35$ 米/秒) 时的切屑基本上是带状的 (图 1-4 b)。两种砂轮速度对切屑形状的影响在于：砂轮速度高时，磨削温度高，切屑的熔融现象较严重，因而生成球状和逗点状的切屑比较多。

(5) 砂轮表

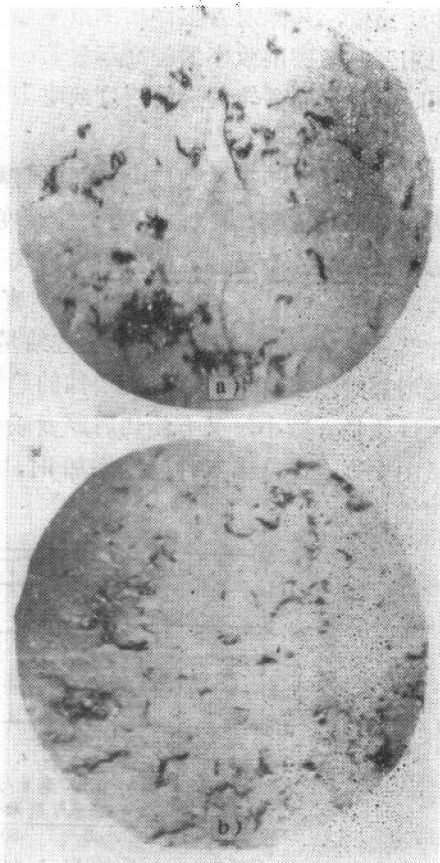


图1-4 不同砂轮速度时的切屑形状
($\times 50$) [26]

a) $v_s = 48.5$ 米/秒, $v_w = 42.5$ 米/分, $f = 0.06$ 毫米/双行程, 工件: 45 钢, HRC41 ~ 42
b) $v_s = 35$ 米/秒, $v_w = 6$ 米/分, 工件: 38CrMoAl

面相邻两颗磨粒的距离 l 增大, 则切屑厚度 a_{\max} 增加, 而 l 的大小, 与砂轮上磨料的粒度有关。磨料粒度细, 则相邻两磨粒的距离小, 使切屑厚度 a_{\max} 减薄, 磨粒留在工件表面上的刻痕深度减小, 使磨削表面光洁度得到提高。

由于砂轮上磨粒分布很不规律, 实际参加切削的磨粒数目和每个磨粒的切削参数不稳定。上述推导过程将磨粒的分布状况简单化, 按推导出来的公式计算所得出的结果与实际切屑厚度数值有很大差别。同时, 推导出来的公式十分烦琐, 实际应用很不方便。在此只是从几何关系上定性分析砂轮速度 v 等的影响, 从而对高速磨削时的切屑厚度等有一个理性上的概念。

第二节 高速磨削时的磨削力

磨削过程中产生的磨削力不仅影响磨床各部分及磨削工艺系统的刚性, 而且也是造成磨削过程中能量消耗和产生热量的原因。磨削力还影响砂轮的工作表面状况和被加工工件表面结构的好坏, 并且也是磨削过程中产生振动的基本原因。

在设计磨床的时候, 也需要知道磨削力的数值以决定磨床各部分刚度和结构参数以及电动机功率的选择。在使用磨床时, 也需要依据磨削力的大小来制订合理的磨削用量。因此, 磨削力的研究是十分重要的。

在磨削过程中, 砂轮上的一个个磨粒对金属进行切削, 这些磨粒大多数具有负前角, 一个具有很大负前角的磨粒切削刃, 以很高的速度切入工件表面时, 磨粒切削刃和工件间产生摩擦、挤压作用, 并且克服工件的弹性、塑性变形的阻力而形成切屑。在此过程中, 砂轮上的磨粒和工件之间产生的作用力与反作用力就是磨削过程中的磨削力。

砂轮上承受的总的磨削力的大小是每个磨粒切削刃产生的切削力和同时参加切削的磨粒切削刃数的乘积：

$$F = \overline{F} m \quad (1-8)$$

式中 \overline{F} ——每个切削刃产生的切削力；

m ——同时参加切削的磨粒切削刃数。

式(1-8)表明：影响磨削力大小的主要因素是每一个切削刃所受力的大小和同时参加磨削的磨粒切削刃数量。

在一般情况下，每个切削刃承受的切削力 \overline{F} 的大小主要与切削刃的切入深度、切屑厚度、切屑断面积和切屑长度有关。切入深度增加，每个切削刃切去的切屑尺寸大，则磨削力增加。切屑的大小则与砂轮及工件速度、磨粒切削尖端的形状以及工件残留不平度高度等有关，当连续切削刃间隔小时，切削刃尖端锋锐，切屑尺寸小，产生的摩擦也就小，磨削力也就减小。

同时参加切削的磨粒切削刃数目(m)则和砂轮与工件的接触面积以及切削刃密度有关系。前者是砂轮与工件的接触弧长和磨削宽度的乘积；后者与砂轮特性、修整条件、磨削条件等因素有关。例如，砂轮粒度较细，修整用量较小，砂轮工作表面上的切削刃数量就多；磨削时的切削深度增加，砂轮半径方向处于内一层位置上的切削刃也能参加切削，使总的参加切削的切削刃数增加，磨削力也就增加。

但是，在磨削过程中，上述两个因素不是独立的变化关系，当切削刃数目减少时，砂轮承受的总的磨削力有可能降低；另一方面，切削刃数目的减少，相邻两个切削刃的间隔增大，在进给量不变时，每个切削刃切入的切削深度增加，切削刃产生的切削力增加，又有可能使总的磨削力增加。这两项因素影响程度的大小将最终决定磨削力的增减。

高速磨削与普通磨削的最大不同点就是砂轮速度高，从图 1-5 可以看出：外圆切入磨削时，在砂轮进给速度相同的情况下，随着砂轮速度的提高，磨削力是下降的。由于磨削力的降低，每颗磨粒承受的切削负荷减小，这样就有利于保持磨粒切削刃的锋锐性，使磨粒具有持久的切削能力，从而提高了磨粒和砂轮的耐用度；同时，法向磨削力的降低，也有利于提高被磨工件的精度和光洁度。

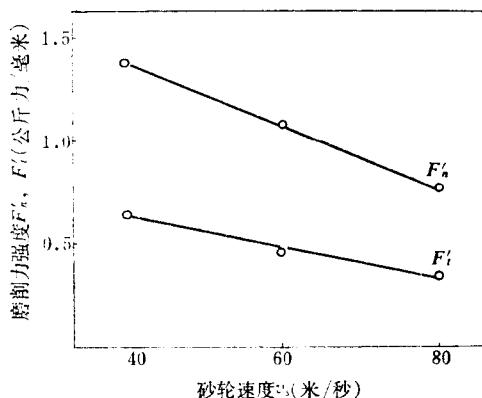


图1-5 砂轮速度与磨削力的关系

v_f : 2 毫米/分 Q' : 300 毫米³/毫米 砂轮: GB80*Z₁A
冷却液: 69-1 乳化液

高速磨削时，为了提高磨削效率，砂轮的切入进给量也比普通磨削高，这样一来，也将影响磨削力的大小。由式 (1-7) 可以看出：当工件转速 n_w 一定时，提高砂轮进给速度 v_f ，工件每转砂轮的切入进给量 Δ 也增加，使切屑厚度增加，导致磨削力的增加。这种关系也可从图 1-6 看出。由图还可以看出：若保持磨削力相同，则随着砂轮速度的提高，砂轮进给速度 v_f 可以大大增加。换句话说，高速磨削时，适

当提高砂轮进给速度 v_f 以后，其磨削力并不一定会比普通磨削时的磨削力高。

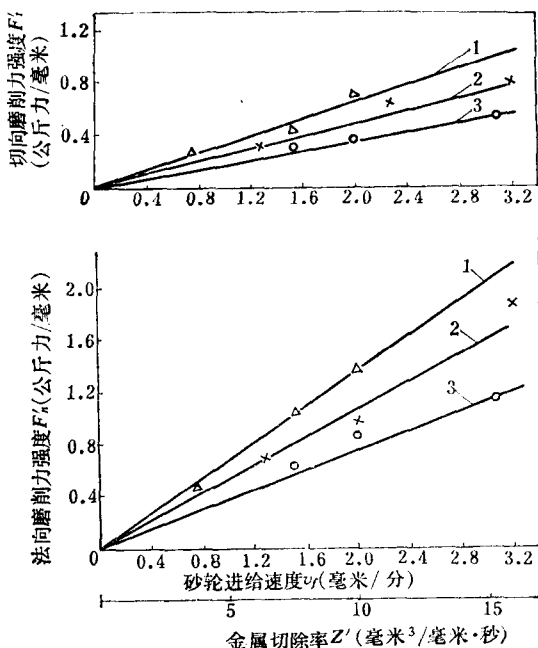


图1-6 砂轮进给速度与磨削力的关系

Q' : 300毫米³/毫米 q : 60 砂轮: GB80*Z₁A 冷却液: 69-1
乳化液 1— $v_s = 40$ 米/秒 2— $v_s = 60$ 米/秒 3— $v_s = 80$ 米/秒

如前所述，由于工件速度对切屑厚度和接触弧长的影响不大，因而总的磨削力的大小与工件速度的关系不大（图1-7）。

外圆切入磨削时，磨削力（ F ）可以分解为图1-8所示的两个分力：法向磨削力 F_n 和切向磨削力 F_t 。有时为了便于分析比较，还可以采用单位磨削宽度上所受的力表示，即：