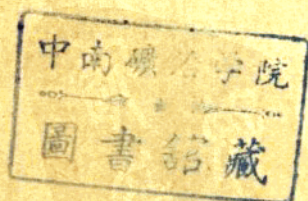


214740

切 削 分 力 的 計 算

H·H·卓烈夫著

王 尔 祺 譯



中国工业出版社

目 次

符号.....	-
緒論.....	3
一 根据切屑收缩决定切削分力的方法.....	9
二 刀具耐用度为常数时决定切削分力的方法.....	21
三 计算切削分力的一般步骤.....	31
1 刀具耐用度为常数时的计算.....	31
2 根据切屑收缩计算切削分力.....	33
四 求切削分力的专用线图与图表的说明.....	34
线图与表格.....	40

使用計算公式、錢圖與表格時，有了帶指示因次的符號注解是比較方便的。因此，我們列出這些注解：

$P_x; P_y; P_z$ (公斤)——切削分力；

$R_x; R_y; R_z$ (公斤)——切屑形成的分力，也就是作用在前面上的力；

$R'_x; R'_y; R'_z$ (公斤)——作用在后面的分力；

$q_x; q_y; q_z$ ——后面單位切削深度上的分力；

$K_x; K_y; K_z$ ——表達切屑形成力的分量比例關係的係數；

σ_s (公斤/毫米²)——拉伸強度極限；

ψ_R ——拉伸時均勻橫向收縮；

H_B ——布氏硬度；

H_{RC} ——洛氏硬度 (C 制)；

$\Delta_{2.5}$ (公斤/毫米²)——相對滑移變形等於 2.5 時的滑移抗力；

γ° ——主法前角；

γ'_1 ——輔前角；

λ° ——主刀刃斜角；

φ° ——主偏角；

r (毫米)——過渡刃圓弧半徑；

l_n ——直錢切削刃的長度；

δ (毫米)——后面磨損稜面寬度；

v (米/分)——切削速度；

t (毫米)——切削深度；

s (毫米/轉)——進給量；

a (毫米)——切削厚度；

b (毫米)——切削寬度；

ξ ——切屑收縮；

η° ——直角切削時，切屑對主法面的偏向角；

ν° ——斜角切削時，切屑對主法面的偏向角；

μ ——切屑對前面的平均摩擦係數；

Q_c (公斤/毫米²)——切屑形成的比功；

q_N (公斤/毫米²)——后面單位正壓力；

$K_{Px}; K_{Py}; K_{Pz}$ ——切削分力與加工材料機械性能關係上的修正係數；

$K_{vx}; K_{vy}; K_{vz}$ ——切削分力與切削速度關係上的修正係數；

$K_{\gamma x}; K_{\gamma y}; K_{\gamma z}$ ——切削分力與前角關係上的修正係數；

$K_{rx}; K_{ry}; K_{rz}$ ——切削分力與過渡刃圓弧半徑關係上的修正係數；

$K_{\delta x}; K_{\delta y}; K_{\delta z}$ ——切削分力與刀具后面磨損關係上的修正係數。

緒 論

切削金屬時所產生力的大小與方向，是這個過程的重要特性。機床與工夾具的工作條件、零件的加工精度以及所需的功率等，都決定於切削力的大小與方向。

為了成功地解決許多實際問題，就要求決定切削力時達到足夠的準確度。例如，設計機床與工夾具時，為了設計出無論在製造上或使用上都具有最好的技術經濟指標的結構，它（準確決定切削力——校者）能使強度與剛度計算有更充分的依據。在制訂工藝規程時，它（準確地決定切削力——校者）使人們能更加正確地選擇零件的安裝與夾緊方案、切削用量，並保證加工零件原定的精度與質量要求的條件下達到更高的勞動生產率與更好地使用設備。

知道了切削力的大小與方向，在分析各種工藝疵病、機器及其裝備損壞的原因，在擬定設備的改裝方案，在按其操作情況制訂工藝規程時以及其他等方面都是有用的。

到目前為止，實際上還是運用經驗公式或者是由這些公式所構成的表格與綫圖來決定切削力。計算切削力的經驗公式是由各別的經驗關係與某一系數的乘積構成，其系數則取決於代替切削條件的諸具體數值，並使它符合於實驗得出的切削力大小。這些經驗公式含有一般經驗公式所具有的缺點。它們或多或少包含了在進行實驗時以及在選擇近似地說明某些因素影響的分析解釋時所引入的誤差。但是，這些公式的主要缺點是在於它們沒有考慮到各個不同因素對切削力影響的相互關係。

許多研究都指出：一個因素對切削力的影響，可能隨着另外一些因素的存在而起很大的變化。因此，為了建立起關於某一因素對切削力影響的完整概念。嚴格說來，能得到多少由其他因素的各別數值所構成的組合，就必須求出多少個（相應數目）各別的關係。由於影響切削力的因素數量很多，所以它們的各別數值

的组合数将是多得很。要想得到相应数量的各别经验关系，实际上是是不可能的。

为了限制实验工作的范围，通常假定一个因素的影响与其他因素无关。这时所需要的各别经验关系最少，即减少到与影响切削力的因素数目相等。关于这一因素的影响与其他因素无关的假定，有时造成极大的错误。这可以以下列具体的例子来说明。

图1表示出用不同的进给量车削35X3MH号钢时，切削速度对水平切削分力影响的实验数据。由图1可知，当进给量从0.125增加到0.78毫米/转（6.2倍），切削速度为15米/分时， P_{xy} 力从90增加到630公斤（7倍），而当切削速度为100米/分时， P_{xy} 力从90增加到190公斤（2.1倍）。

由此可见，在切削速度 $v = 15$ 米/分时，求到的 P_{xy} 力与进给量的各别经验关系，若把它推广到另一速度时，将产生250%的误差。

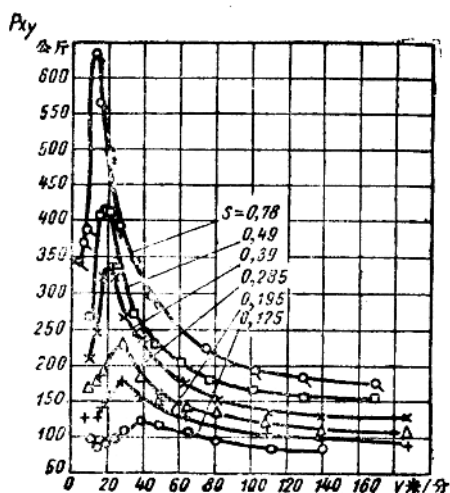


图1 以不同的进给量($t = 4$ 毫米; $\varphi = 60^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $r = 1$ 毫米)纵向车削35X3MH号钢时，切削速度对水平切削分力的影响。

車削 40 号鋼时, 切削速度与进給量对軸向切削分力 P_x 影响的实验数据, 由图 2 曲线可以看出, 当进給量增大 5 倍时, 切削分力 P_x 随切削速度的增大而增大 (由 2 到 5 倍)。进給量对軸向切削分力的影响却完全两样, 如图 3 所示。图中表明用料列索夫車刀車削 40XHM 号鋼时所得到的实验数据。

从图 3 可以看出, P_x 力不但不随进給量的加大而增大, 相反地却下降了。在上述两种情况中, 进給量对 P_x 力的影响是如此

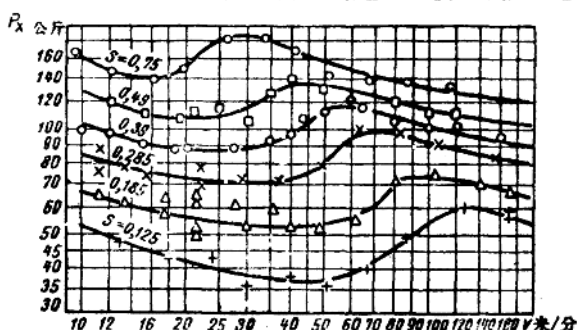


图 2 以不同的进給量 ($t = 4$ 毫米; $\varphi = 60^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $r = 1$ 毫米) 纵向車削 40 号鋼时, 切削速度对軸向切削分力的影响。

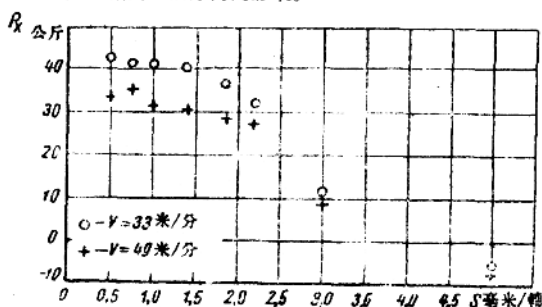


图 3 以不同的切削速度 ($t = 1$ 毫米; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 0^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $r = 1.5$ 毫米) 纵向車削 40XHM 号鋼时, 进給量对軸向切削分力的影响。

不同，以致可能的相对误差甚至于难以作出定量的评估。

图4表示车削11种不同的钢时切削速度对垂直切削分力的影响。被加工材料性质对 P_z 力的影响，随着切削速度的变化而有极大的变化。例如，切削18XHB与30号钢，切削速度为15米/分时， P_z 力相差2.2倍，而当切削速度为160米/分时，相差仅仅5%。

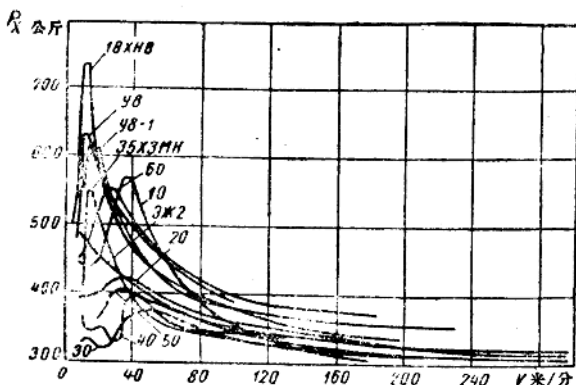


图4 纵向车削各种钢时 ($s = 0.49 \sim 0.51$ 毫米/转; $t = 4$ 毫米; $\varphi = 60^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $r = 1$ 毫米)，切削速度对垂直切削分力的影响。

图5表示在两种不同的切削速度： $v = 19$ 米/分与 $v = 75$ 米/分，车削40XHM-1号钢时，车刀后面磨损棱面宽度对切削分力的影响。当切削速度为19米/分与75米/分时，车刀磨损对切削力的影响有很大的不同。第一种情况下，这一影响可认为没有，而在第二种情况下，它引起各切削分力改变2~2.5倍。

图6是车刀（主偏角 $\varphi = 0^\circ$ ）后面磨损棱面宽度不同时，切削速度对加工40XHM-2号钢的各切削分力影响的曲线。由曲线可看出，当磨损（ $\delta = 0.55$ 毫米）较大时，径向切削分力 P_y 在切削速度 $v = 20 \sim 80$ 米/分范围内有很大的增长。而在相同的切削速度范围内，当磨损（ $\delta = 0.1$ 毫米）较小时，分力 P_y 不但没有增加，甚至于有些降低。

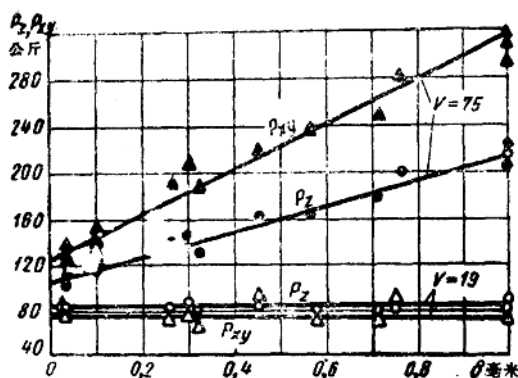


图5 以两种切削速度 ($s = 0.156$ 毫米/转; $t = 2$ 毫米; $\varphi = 30^\circ$; $\gamma = -10^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $r = 0.5$ 毫米) 纵向车削 40XHM-1 号钢时, 后面磨损棱面宽度对垂直与水平切削分力的影响。

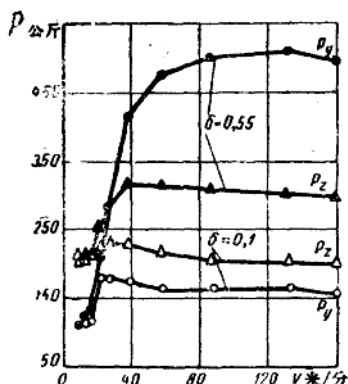


图6 自由切削 40XHM-2 号钢时 ($b = 5.8$ 毫米; $a = 0.156$ 毫米; $\gamma = 0^\circ$; $\lambda = 0^\circ$), 两种不同的后面磨损情况下, 切削速度对水平与垂直切削分力的影响。

图7所示是用各种不同的前角(主偏角 $\varphi = 0^\circ$)在水中车削20X号钢时, 切削厚度对水平切削分力 P_x 的影响曲线。曲线指出了, 当前角 $\gamma = 0^\circ$ 时, 切削厚度从0.01增大到0.3毫米, 会使 P_x 力增大成7.5倍, 而当前角 $\gamma = 20^\circ$ 时, 同样地增大切削厚度, 这力没有任何增加, 而在前角 $\gamma = 40^\circ$ 时, 甚至于产生了 P_x 力显著的下落。

图8所示是用无磨损车刀与后面磨损 $\delta = 0.25$ 毫米的车刀(主偏角 $\varphi = 30^\circ$)车削

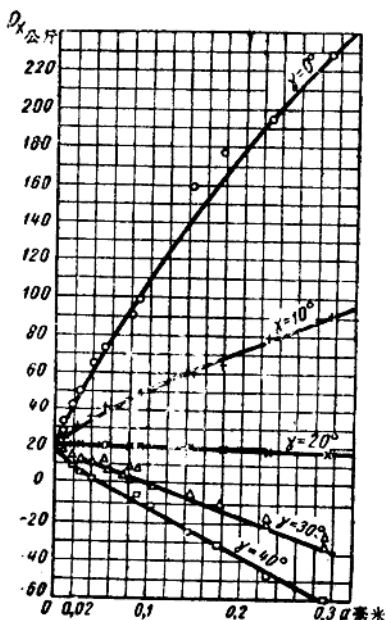


图7 在水中自由切削 20X 号钢 ($v = 0.7$ 米/分; $b = 10$ 毫米; $\lambda = 0^\circ$)。不同的前角下, 切削厚度对水平切削分力的影响。

不正确的。除了少数例外, 每个经验公式对于求出它的各别切削条件来说都是正确的。任何一个经验公式都是这样, 它对于其它的切削条件来说, 在某种程度上是不正确的。

显而易见, 有时用平均系数与幂指数的方法着手 [综合] 经验公式, 并不能得到更准确的结果, 而仅仅是在包括 [综合] 经验公式的那些切削条件范围内, 误差比较均匀地分布了。

伴随着机器制造业的发展, 不断地扩大了实际采用切削条件的范围。实际上广泛采用了那些切削条件的组合, 而它以往用得很少或者是没有用过。这个过程一方面取决于出现了大量新牌号

40XHM-5 号淬硬钢时, 进给量对径向切削分力 P_y 的影响。根据上面那条曲线, 进给量对 P_y 力的影响较小, 其近似的表示式为 $P_y = c_1 s^{0.16}$ 。根据下面那条曲线, 这一影响比较大, 近似的表示式为 $P_y = c_2 s^{0.6}$ 。

还可以举出许多别的例子来说明, 在一种切削条件下所确定的各别经验关系, 不能推广到其它的切削条件上。不同研究者所得到的经验公式相差得很悬殊, 这主要是由于上述原因。

因此, 企图从各个作者所公布的经验公式中确定那一个更可靠, 都是不

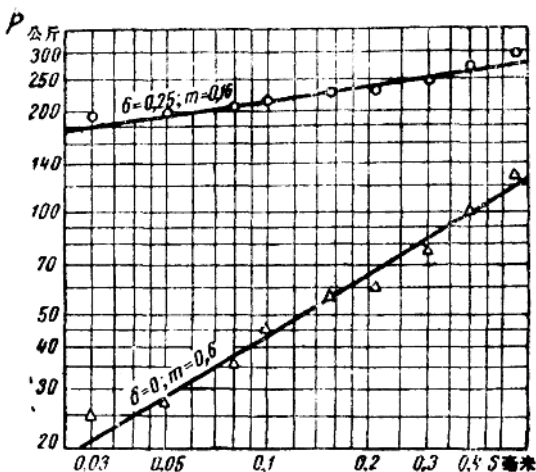


图 8 纵向车削 40XHM-5 号钢 ($v = 17$ 米/分; $t = 1$ 毫米; $\varphi = 30^\circ$; $\gamma = -10^\circ$; $\lambda = 0^\circ$)。在两种不同的后面磨损时, 进给量对径向切削分力的影响。

的鋼、合金以及它們的热加工方法。因此, 由加工材料性质而定的切削条件愈来愈成为多种多样了。从另一方面說来, 創造了新的、并改善了现有的刀具材料、刀具结构与金属切削机床, 显著地扩大了实际采用的切削用量范围与刀具几何参数。在这种情况下要得到所需数量的各別經驗关系, 并予以利用就显得愈来愈困难了。

近年来所进行的切削过程力学領域内的研究結果, 不仅揭示了切削力决定方法的缺点的实质, 而且建立了新的方法, 在相当大的程度上消除了这些缺点。这些方法中有两种在实际应用上最为方便, 簡述如下。

一 根据切屑收縮决定切削分力的方法

研究了形成流屑时的塑性变形得知, 在实际上所采用的切削条件下, 切屑形成过程基本上是靠狭小区域 (图 9 上 LOM 区域) 内单方面的滑移来实现的。这滑移的平均方向近似地表示为假想

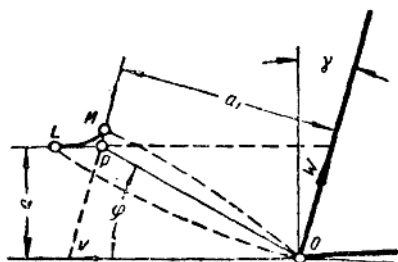


图9 假想滑移面OP的配置图,在实际上采用的一般切削条件下,它近似地与切屑形成区LOM的滑移平均方向相重合。

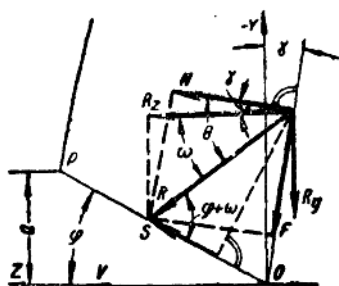


图10 直角自由切削时的简化作用力图。

ω ——作用角,也就是力矢R与切削速度矢量v的夹角。

由图10得出,切屑形成的主要分力(切线分力) R_s :

$$R_s = R \cos \omega, \quad (2)$$

由此

$$R_s = \tau_y \frac{ab}{\sin \varphi} \frac{\cos \omega}{\cos(\varphi + \omega)}.$$

因为切屑形成的比功等于:

$$Q_c = \frac{R_s}{ab},$$

所以

$$Q_c = \tau_y \frac{\cos \omega}{\sin \varphi \cdot \cos(\varphi + \omega)}, \quad (3)$$

由此

$$Q_c = \tau_y [\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{tg}(\varphi + \omega)]. \quad (4)$$

滑移面OP位置,它与切削速度矢量形成了夹角 φ ,称为假想滑移角或简称为滑移角。

假设,沿OP面作用着切应力,等于切屑材料的塑性滑移抗力 τ_y ,并忽略应力状态的复杂性因素,则可借图10上作用力简图得出下面的关系式:

$$R = \tau_y \frac{ab}{\sin \varphi} \frac{1}{\cos(\varphi + \omega)}. \quad (1)$$

式中 R——切屑形成力,也就是刀具前面作用于切屑上的力;

a——切削厚度;

b——切削宽度;

以 ξ 来表示切屑沿厚度方向的收缩, 可借图 9 求得:

$$\operatorname{ctg} \varphi = \frac{\xi - \sin \gamma}{\cos \gamma} \quad (5)$$

式中 γ —— 前角。

理論与实验研究証明, 增大作用角 ω , 总是导致滑移角 φ 的减小。因此, $\varphi + \omega$ 之和一般变化很少。实验指出, 对实际上所采用的切削条件, 可以使用关系式:

$$\varphi + \omega = c. \quad (6)$$

选择 c 的大小时应该注意到: 对含碳量 0.15% 以下的碳素鋼, $c = 40^\circ$ 。对含碳量从 0.15 至 0.25% 的碳素鋼以及粒状珠光体碳素鋼与低合金鋼, $c = 46^\circ$ 。对含碳量超过 0.25% 的碳素鋼, 含有片状或索氏体状珠光体的低合金鋼以及含有細小分散碳化物的高合金鋼, $c = 50^\circ$ 。当切削厚度較大 ($a > 0.8$ 毫米) 与前角較大 ($\gamma > 20^\circ$) 时, 上述 c 值应该减小 4° 。

根据关系式 (5) 与 (6), 可得到下列形式的公式 (7):

$$Q_c = \tau_y \left(\frac{\xi - \sin \gamma}{\cos \gamma} + \operatorname{tg} c \right). \quad (7)$$

如果知道了切屑收缩 ξ 与切屑形成区的塑性滑移抗力 τ_y , 便可以用公式 (7) 計算切屑形成的比功。

τ_y 的大小可借被加工材料的拉伸, 扭轉或压缩等机械实验方法求得, 并达到足够的准确度。

大家知道在机械实验时, 切应力 τ 与真正的滑移 ε 間将很好地保持多边形关系:

$$\tau = A\varepsilon^m \quad (8)$$

在切削过程具有較大变形 ($\varepsilon \approx 2.5$) 的范围内, 这个关系式的外推法 (Экстраполяция) 将給出近似于 τ_y 的 τ 值 (参看图 11~13) 因此, 为了确定 τ_y , 可运用关系式:

$$\tau_y = A2.5^m. \quad (9)$$

图 11 繪出了在大范围内改变切削条件时式 (9) 的实验性檢驗曲綫。

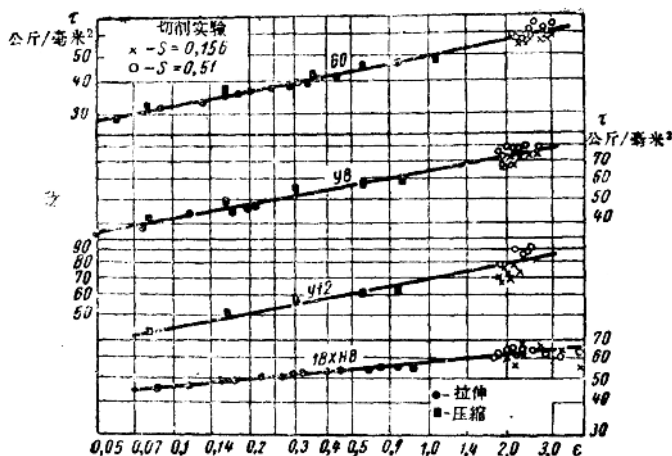


图11 在机械实验与切削 60、48、12、18XHB 号钢时，切应力与滑移变形间的关系对比。在切削时测得变形之后取相对滑移 ($s=4$ 毫米; $s=0.156$ 及 0.51 毫米/转; $v=12\sim 280$ 米/分)。

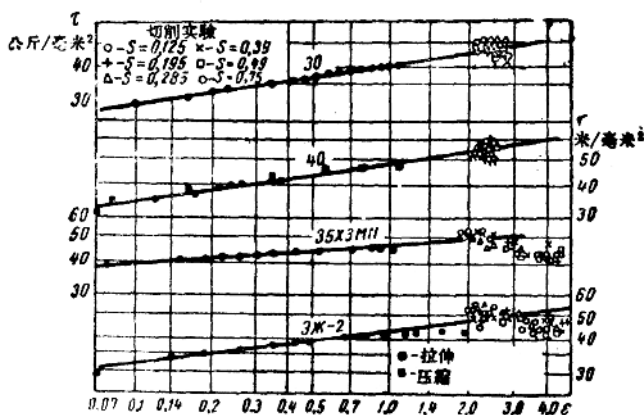


图12 在机械实验与切削 30、40、35X3M11、3X-2 号钢时，切应力与滑移变形间的关系对比。切削时测得变形之后，取相对滑移 ($s=4$ 毫米; $s=0.125; 0.195; 0.285; 0.49$ 及 0.78 毫米/转; $v=16\sim 230$ 米/分)。

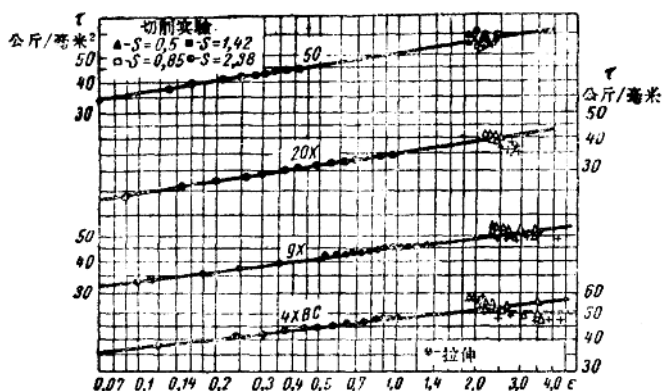


图13 在机械实验与切削 50、20X、9X、4XBC 号钢时，切应力与滑移变形间的关系对比。切削时测得变形之后取相对滑移 ($s = 1.2$ 毫米; $s = 0.5; 0.85; 1.42; 2.38$ 毫米/转; $v = 6 \sim 100$ 米/分)。

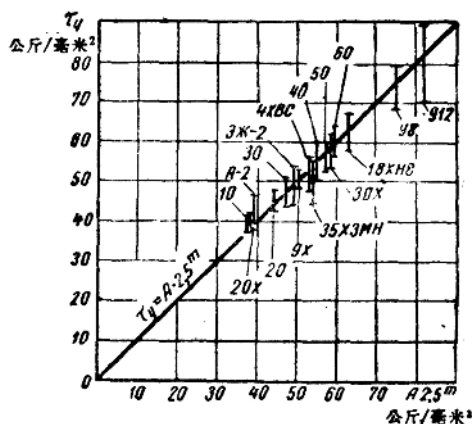


图14 在相对滑移等于 2.5 时，切屑形成区域内假定的切应力与被加工材料滑移阻力的关系图。

引用符号 $A_{2.5} = A_{2.5}$, 由 (7) 式与 (9) 式可得到:

$$Q_c = A_{2.5} \left(\frac{\xi - \sin \gamma}{\cos \gamma} + \operatorname{tg} \epsilon \right). \quad (10)$$

为了确定 $A_{2.5}$ 的大小, 采用拉伸实验是合理的, 因这是最容易实现的。为此, 在试件拉伸时, 应该记下有效的横向收缩变形 q 和有效拉应力 S , 并考虑到试件颈部应力集中的 H. H. 达维靖柯夫修正。接着, 计算最大的切应力 $\tau = \frac{S}{2}$, 与滑移变形 $\epsilon = 1.5 \ln \frac{1}{1-q}$ 。根据这些数据, 在双对数纸上构制 τ 与 ϵ 的关系图, 它是直线性的。相当于变形 $\epsilon = 2.5$ 的应力 τ , 都在这条线上。所求得之 τ 值乃是所要求的 $A_{2.5}$ 。

如果用这种方法求 $A_{2.5}$ 有困难, 那末可以应用近似的关系式:

$$A_{2.5} = \frac{0.6\sigma_B}{1-1.7\psi_B} \quad (11)$$

式中 σ_B ——拉伸强度极限;

ψ_B ——试件的均匀相对横向收缩。

在不知道 ψ_B 值的情况下, 可采用下面 $A_{2.5}$ 与 σ_B 之间的关系, 作为第一近似值。

对退火碳素钢与奥氏体钢, $A_{2.5} \approx \sigma_B$ 。对于正火与调质碳素钢以及合金钢,

$$A_{2.5} \approx 0.9\sigma_B;$$

对淬硬钢

$$A_{2.5} \approx 0.8\sigma_B$$

用公式 (10) 求出切屑形成的比功之后, 便可以求出切屑形成的各分力。由图 10 得知, 直角自由切削时, 切屑形成力的法线分力 R_y 与切线分力 R_x 的关系如下:

$$R_y = R_x \operatorname{tg} \omega. \quad (12)$$

因为

$$R_x = Q_c ab,$$

所以

$$R_y = Q_c ab \operatorname{tg} \omega; \quad (13)$$

作用角 ω 的大小可用公式 (14) [由公式 (5) 与 (6) 导出的] 求出:

$$\omega = C - \arctg \frac{\cos \gamma}{\xi - \sin \gamma} \quad (14)$$

在非自由切削或斜切削时，形成切屑的各分力 R_x , R_y 与 R_z 互相之间的关系比较复杂：

$$R_x = R_z K_x; \quad (15a)$$

$$R_y = R_z K_y; \quad (15b)$$

式中

$$K_x = \frac{(\mu \cos \gamma \cos \gamma - \sin \gamma) \sin \varphi - [(\cos \gamma + \mu \cos \gamma \sin \gamma) \sin \lambda + \mu \sin \gamma \cos \lambda] \cos \varphi}{(\cos \gamma + \mu \cos \gamma \sin \gamma) \cos \lambda - \mu \sin \gamma \sin \lambda} \quad (16)$$

$$K_y = \frac{(\mu \cos \gamma \cos \gamma - \sin \gamma) \cos \varphi + [(\cos \gamma + \mu \cos \gamma \sin \gamma) \sin \lambda + \mu \sin \gamma \cos \lambda] \sin \varphi}{(\cos \gamma + \mu \cos \gamma \sin \gamma) \cos \lambda - \mu \sin \gamma \sin \lambda} \quad (17)$$

公式 (16) 与 (17) 是在最一般的切削条件下，根据前面上力的平衡条件的分析而导出的。根据这些公式，切屑形成力 R 各分力的比例关系依平均摩擦系数 μ 与切屑的偏向角 ν 而定，它们决定力 R 相对于前面的指向。除此之外，分力的比例还依主前角 γ 、主刀刃斜角 λ 与主偏角 φ 而定，它们决定前面的空间指向。

μ 与 ν 是未知的，应预先确定 μ 值可用下述方法来决定。

根据图10:
$$\mu = \frac{F}{N} = \operatorname{tg} \theta,$$

$$\theta = \omega - \gamma,$$

因此

$$\mu = \operatorname{tg}(\omega - \gamma),$$

由此，根据公式 (14) 得：

$$\mu = \operatorname{tg}(C - \gamma - \arctg \frac{\cos \gamma}{\xi - \sin \gamma}) \quad (18)$$

应该指出，当前角 $\gamma > 10^\circ$ 时，为了获得必要的准确度，代入公式 (18) 的不应当是主法面前角，而应当是切屑排出面中实际的前角大小。

在最一般情况下，切屑偏向角 ν 按公式 (19) 求得：

$$\nu = \eta - \nu^{0.08} \arctg(\operatorname{tg} \lambda \cos \eta + \operatorname{tg} \gamma \sin \eta), \quad (19)$$

式中 ν —— 切削速度；

η ——根据公式 (20) 或 (21) 所求到的角:

$$\sin 2\eta = \left(\frac{s}{t} + \frac{r}{t} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) \sin^2 \varphi; \quad (20)$$

$$\sin 2(\varphi - \eta) = \frac{1}{\frac{s}{t} + \frac{r}{t} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}; \quad (21)$$

式中 r ——过渡切削刀的圆角半径。

公式 (20) 适用于 [正切削], 这时:

$$\left(\frac{s}{t} + \frac{r}{t} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) \sin \varphi < 1.$$

公式 (21) 适用于 [反切削], 这时:

$$\left(\frac{s}{t} + \frac{r}{t} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) \sin \varphi > 1.$$

为了求出 η , 使用由公式 (20)、(21) 所构成的线图(图27)是比较方便的。

非自由切削时, 切屑形成力之切线分力可由公式 (12) 求得, 但最方便的公式是:

$$R_x = Q_c s t_0. \quad (22)$$

根据 (22), (15a) 与 (15b), 得到了求分力 R_x 与 R_y 的公式:

$$R_x = Q_c s t K_x; \quad (23)$$

$$\bullet R_y = Q_c s t K_y. \quad (24)$$

按公式 (22)~(24) 计算的切屑形成的各分力 R_x 、 R_x 与 R_y , 与相应的各切削分力 P_x 、 P_x 与 P_y 仅仅相差各分力的数值 R'_x 、 R'_x 与 R'_y , 后三个分力是作用在刀具后面的:

$$P_x = R_x + R'_x; \quad (25)$$

$$P_x = R_x + R'_x; \quad (26)$$

$$P_y = R_y + R'_y. \quad (27)$$

当后面磨损小、切削厚度大, 以及被加工材料硬度中等时, 后面的力 R'_x 、 R'_x 与 R'_y 可以不考虑, 因为它们比前面的力小

● 此式原文为 $R_x = Q_c s t K_y$, 系 $R_y = Q_c s t K_y$ 之误——译者。