

超精密切削模型研究

熊顺和

何友义

李向明

(北京303研究所)

(机械工程系)

(华中理工大学)

摘 要

本文从普通切削模型(平面剪切面模型)出发,提出了一种超精密切削模型(曲面剪切面模型),并推出了该切削模型的力学关系式。

引 言

为了便于理解和研究金属切削过程,采用适当简化的切削模型来描述它,是一种可取的方法。普通切削模型已有成熟理论^(1,2,3),但对于新近开发出来的超精密切削显然是不适用的。本文从著名的Lee and Shaffer切削模型出发,提出了一种超精密切削模型,并推出该切削模型的力学关系式。

一、超精密切削模型的建立

1、Lee and Shaffer切削模型

如图一所示,正角普通切削,稳定地形成带状切屑。这里包含三个假设:

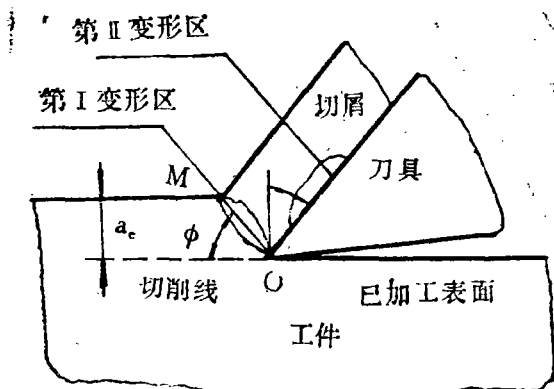
- (1) 切削刃与切削方向垂直;
- (2) 切屑不作横向流动,只作平面塑性流动;
- (3) 刀刃是锋利的,即 $r_\beta = 0$,后刀面不与工件接触。

这个模型的关键点在于两个变形区,剪切面和剪切角的概念,它的切屑分界点O就落在切削线上。

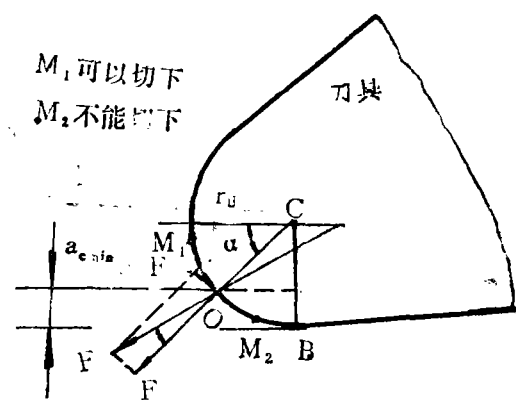
2、超精密切削模型

对于普通切削,切削厚度 a_c 与刀具钝圆半径 r_β 相差很远, $a_c \gg r_\beta$ 可以认为 $r_\beta = 0$ 。然而对于超精密切削, a_c 与 r_β 几乎达到同一数量级,因此必须考察钝圆半径在切削过程中的作用。

本文于1990年2月22日收到



图一 普通切削模型（平面剪切面模型）



图二 刀尖受力分析

在切削过程中，刀具钝圆弧上每一点都受到正压力 F_n 和摩擦力 F_f ，其合力为 F_r （图二）。根据最大剪应力理论，当 F_r 与切削速度 $\vec{V}$ 的夹角小于 45° 时，此点的金属可以被切下来；当 F_r 与 $\vec{V}$ 的夹角大于 45° 时，此点的金属被压向工件基体，不能被切除；当 F_r 与 $\vec{V}$ 的夹角等于 45° 时，此点的金属处于临界状态，称为分界点（或分流点），切屑就是在此点与工件分离的。

从图二的几何关系中可以确定点O的位置，亦即最小切削厚度 a_{cmin}

$$\begin{aligned}
 a_{cmin} &= r_\delta (1 - \sin \alpha) \\
 \alpha &= 45^\circ + \beta \\
 \beta &= \tan^{-1} \frac{F_f}{F_n} \\
 a_{cmin} &= r_\delta [1 - \sin(45^\circ + \tan^{-1} \frac{F_f}{F_n})] \quad (1)
 \end{aligned}$$

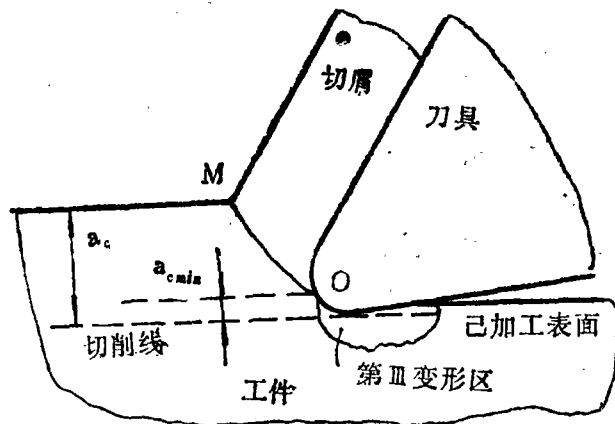
它与钝圆半径 r_δ 和刀具、工件间的摩擦角 β 有关。

和普通切削模型相比，这里O点就相当于刀尖，O点以上部分，它与前刀面的作用相似，可以看成是前刀面的延伸，O点以下部分起着后刀面的作用，可以看成是后刀面的延伸。由此可见，刀具的前、后刀面不是平面，而是曲面，前角、后角和剪切角也不是常数。表1列出了普通切削模型和超精密切削模型的主要特征。

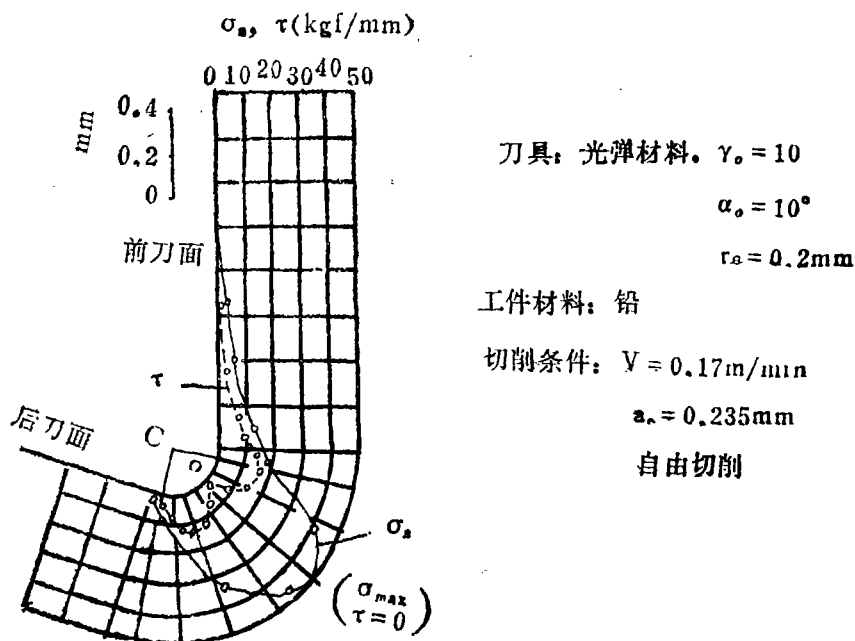
普通切削模型和超精密切削模型的特征 表 1

特征 模型	钝圆半径	分离点	前后刀面	前后角	剪切面	剪切角
普通切削模型	$r_\delta = 0$	刀尖	平面	常数	平面	常数
超精密切削模型	$r_\delta \neq 0$	分界点O	曲面	变量	曲面	变量

基于以上分析，得到如图三的超精密切削模型，即曲面剪切面模型。该模型既反映了超精密切削的特性，又能和现有的切削理论形成一个统一的整体。



图三 超精密切削模型 (曲面剪切面模型)



图四 刃前区的应力分布 (文献 8)

图四是日本学者津枝等人进行铅的切削试验时,用偏光弹性测得的切削刃圆角及其附近部位的应力分布状态⁽⁶⁾。从图中可以看出,在切削刃圆角上某点O,剪应力 $\tau=0$,而正应力达到最大。沿O点两边,剪应力的符号相反,先增后减再趋向于零。可见,津枝等人的实验结果,支持了我们在前面描述的确定切屑分界点O位置的方法。

二、切削模型的力学关系

1、Lee and Shaffer切削模型力学关系式如图五所示。

从图五的受力分析中容易求出

$$F_s = \frac{\tau a_w a_c \cos(\beta - \gamma_o)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \gamma_o)} \quad (2)$$

$$F_r = \frac{\tau a_w a_c \sin(\beta - \gamma_o)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \gamma_o)} \quad (3)$$

显而易见, F_s 和 F_r 与 a_c 的关系是一条通过原点的直线。又根据最大剪应力理论有剪切角公式。

$$\phi = \frac{\pi}{4} - \beta + \gamma_o \quad (4)$$

式中: τ ——剪切面上的剪切应力;

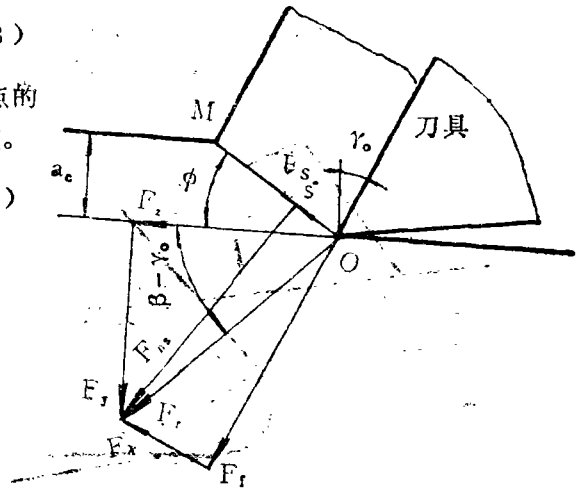
a_w ——切削宽度;

a_c ——切削厚度;

ϕ ——剪切角;

β ——摩擦角;

γ_o ——刀具前角;



图五 普通切削模型力学关系

2. 超精密切削模型力学关系式

(1) 前刀面上的力

前刀面上的力是生成切屑而产生的, 与普通切削在本质上是是一致的, 因此可直接应用(2)、(3)、(4)式。这里因存在一个最小切削厚 a_{cmin} 切不下来; 以及前角、剪切角都是变量, 作适当代换得:

$$F_{s1}(y) = \frac{\tau a_w (a_c - a_{cmin}) \cos(\beta - \gamma_o(y))}{\sin \phi(y) \cos(\phi(y) + \beta - \gamma_o(y))} \quad (5)$$

$$F_{r1}(y) = \frac{\tau a_w (a_c - a_{cmin}) \sin(\beta - \gamma_o(y))}{\sin \phi(y) \cos(\phi(y) + \beta - \gamma_o(y))} \quad (6)$$

$$\phi(y) = \frac{\pi}{4} - \beta + \gamma_o(y) \quad (7)$$

为计算方便, 我们引入两个概念: 平均前角 $\bar{\gamma}_o$ 和平均剪切角 $\bar{\phi}$ 。我们认为: 一个前角为 $\bar{\gamma}_o$, 剪切角为 $\bar{\phi}$ 的平面剪切面模型和图三的曲面剪切面模型在前刀面上产生的切削力是相等的。于是有:

$$F_{s1} = \frac{\tau a_w (a_c - a_{cmin}) \cos(\beta - \bar{\gamma}_o)}{\sin \bar{\phi} \cos(\bar{\phi} + \beta - \bar{\gamma}_o)} \quad (8)$$

$$F_{r1} = \frac{\tau a_w (a_c - a_{cmin}) \sin(\beta - \bar{\gamma}_o)}{\sin \bar{\phi} \cos(\bar{\phi} + \beta - \bar{\gamma}_o)} \quad (9)$$

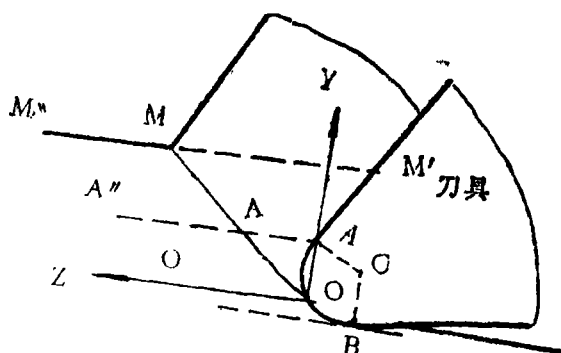
$$\bar{\phi} = \frac{\pi}{4} - \beta + \bar{\gamma}_o \quad (10)$$

下面我们来求解平均前角 $\bar{\gamma}_o$ 和平均剪切角 $\bar{\phi}$ 。

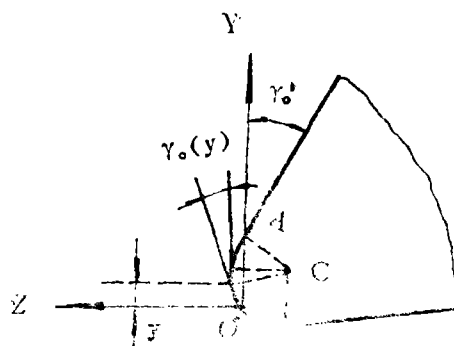
以分界点 O 为坐标原点, y 轴为切削厚度方向, z 轴沿切削速度方向建立坐标系 (如图六)。由于被切削的金属层相互之间不产生干涉, 可以认为各金属层是独立地被切下来的。将 OO' 与 $A'A''$ 之间的金属看成是由钝圆弧 $\widehat{OA}$ 切下来的, 将 $A'A''$ 与 MM'' 之间的金属看

成是由前刀面AM'段切下来的。剪切面为OA'M, 其中OA'为曲面, A'M为平面。对每一层金属dy, 都有一个前角 $\gamma_o(y)$ (由式(7)可得 $\phi(y)$), 先求出 $\gamma_o(y)$ 或 $\phi(y)$ 的表达式, 再对坐标进行曲线积分, 就可得 $\overline{\gamma_o}$ 或 $\overline{\phi}$ 。由图七知:

$$\gamma_o(y) = \begin{cases} \gamma_o, & r_\beta(1 + \sin\gamma_o) - a_{cmin} \leq y \leq a_c - a_{cmin} \\ \arcsin \frac{y - (r_\beta - a_{cmin})}{r_\beta}, & 0 < y < r_\beta(1 + \sin\gamma_o) - a_{cmin} \end{cases} \quad (11)$$



图六 坐标系建立



图七 γ_o 分析

利用曲线积分求得:

$$\begin{aligned} \overline{\gamma_o} &= \frac{\int_{OAM'} \gamma_o(y) dy}{a_c - a_{cmin}} = \frac{1}{a_c - a_{cmin}} \left[\int_{OA} \arcsin \frac{y - (r_\beta - a_{cmin})}{r_\beta} dy + \int_{AM} \gamma_o dy \right] \\ &= \frac{1}{a_c - a_{cmin}} \left[\int_{a_{cmin}}^{r_\beta(1 + \sin\gamma_o) - a_{cmin}} \arcsin \frac{y - (r_\beta - a_{cmin})}{r_\beta} dy \right. \\ &\quad \left. + \int_{r_\beta(1 + \sin\gamma_o) - a_{cmin}}^{a_c - a_{cmin}} \gamma_o dy \right] \\ &= \frac{1}{a_c - a_{cmin}} \left[r_\beta \cos\gamma_o + (a_c - r_\beta)\gamma_o - r_\beta \cos\gamma_o - (r_\beta - a_{cmin})\gamma_o \right] \quad (12) \end{aligned}$$

式中 $\gamma_{o0} = \arcsin \frac{r_\beta - a_{cmin}}{r_\beta}$ 为O点处的前角。

由式(12)看出: 平均前角与钝圆半径 r_β 、刀具前角 γ_o 、切削厚度 a_c 及最小切厚 a_{cmin} 有关。平均剪切角 $\overline{\phi}$ 可直接由式(10)求得, 或把 $\gamma_o(y)$ 代入式(7), 再积分求得 $\overline{\phi}$, 结果是一样的。将式(10)、式(12)代入式(8)、式(9)即可得到前刀面上的切削力 F_{s1} 和 F_{t1} 。

(2) 后刀面上的力

后刀面上的力来源于第三变形区, 也就是后刀面(包括钝圆的一部分)与工件材料相互作用的力。要对后刀面上的力进行严密的数学、力学分析是十分困难的, 这里给出近似模型, 如图八所示。

设后刀面与工件材料的结合面上受到了均布的正应力 p_o , 又设后刀面上的平均摩擦系数为 μ , 则均布的剪应力为 μp_o , 忽略材料的侧向塑流, 则可近似认为 $a_{cmin} = \Delta h$ 。根据文献[7] p_o 可表示为:

$$p_o = f(\beta_o) \left[1 + \mu \phi(\beta_o) \right] \left(\frac{HB}{100} \right)^2 + \sin \left(\frac{\beta_o}{2} + \beta' \right) \left(\frac{\sqrt{1+\mu^2}}{2\sin\beta_o} \right) \left(\frac{HB}{100} \right) \quad (13)$$

式中: β_o ——楔角;

β' ——后刀面摩擦角。

从图八可知, 后刀面与材料相接触的面积为 $\widehat{OBE}$ 圆柱面和 $\overline{EF}$ 平面。 $\overline{EF}$ 平面的面积为:
 $a_w(a_{cmln} - r_\beta + r_\beta \cos\alpha_o) / \sin\alpha_o$

取极坐标, 积分有:

$$\begin{aligned} F_{x2} &= \int_{\gamma_{oo}}^{\frac{\pi}{2} + \alpha_o} a_w p_o \cos\theta \cdot r_\beta d\theta + \int_{\gamma_{oo}}^{\frac{\pi}{2} + \alpha_o} a_w \mu p_o \cos \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) r_\beta d\theta \\ &\quad + a_w p_o \frac{a_{cmln} - r_\beta + r_\beta \cos\alpha_o}{\sin\alpha_o} \cos \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_o \right) \\ &\quad + a_w \mu p_o \frac{a_{cmln} - r_\beta + r_\beta \cos\alpha_o}{\sin\alpha_o} \cos\alpha_o \\ &= a_w p_o r_\beta (\cos\alpha_o - \sin\gamma_{oo}) + a_w \mu p_o r_\beta (\sin\alpha_o + \cos\gamma_{oo}) \\ &\quad - a_w p_o (a_{cmln} - r_\beta + r_\beta \cos\alpha_o) + a_w \mu p_o (a_{cmln} - r_\beta + r_\beta \cos\alpha_o) \operatorname{ctg}\alpha_o \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} F_{y2} &= \int_{\gamma_{oo}}^{\frac{\pi}{2} + \alpha_o} a_w p_o \sin\theta r_\beta d\theta + \int_{\gamma_{oo}}^{\frac{\pi}{2} + \alpha_o} a_w \mu p_o \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) r_\beta d\theta \\ &\quad + a_w p_o \frac{a_{cmln} - r_\beta + r_\beta \cos\alpha_o}{\sin\alpha_o} \sin \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_o \right) \\ &\quad + a_w \mu p_o \frac{a_{cmln} - r_\beta + r_\beta \cos\alpha_o}{\sin\alpha_o} \sin\alpha_o \\ &= a_w p_o r_\beta (\sin\alpha_o + \cos\gamma_{oo}) + a_w \mu p_o r_\beta (\sin\gamma_{oo} - \cos\alpha_o) \\ &\quad + a_w p_o (a_{cmln} - r_\beta + r_\beta \cos\alpha_o) \operatorname{ctg}\alpha_o + a_w \mu p_o (a_{cmln} - r_\beta + r_\beta \cos\alpha_o) \end{aligned} \quad (15)$$

将 p_o 代入式(14)、(15), 得到后刀面上的力 F_{x2} 和 F_{y2} , 式中符号意义同前。

(3) 切削力与切削厚度的关系

将前刀面上的力和后刀面上的力相加, 即得到超精密切削条件下切削力——切削厚度的关系。

$$F_x = F_{x1} + F_{x2} \quad (16)$$

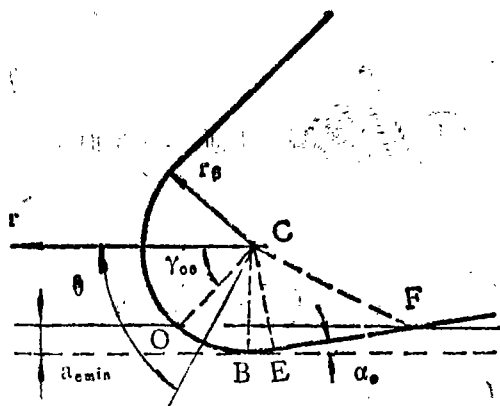
$$F_y = F_{y1} + F_{y2} \quad (17)$$

F_{x1} 、 F_{y1} 与 a_c 的关系曲线如图九。它是一个分段函数。

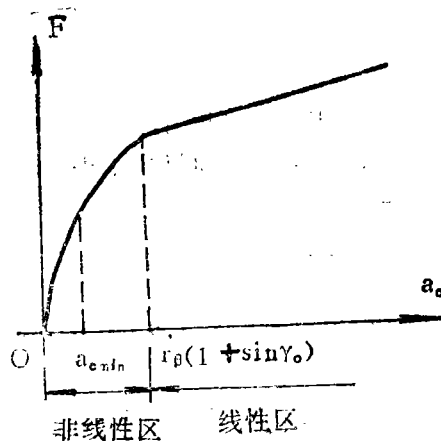
当 $0 \leq a_c \leq a_{crln}$ 时, 不产生切屑, 但有强烈的挤压与摩擦作用, 力增加很快;

当 $a_{crln} < a_c \leq r_\beta(1 + \sin\gamma_o)$ 时, 由于钝圆参加切削, 平均前角较小, 切削力增大也较快;

当 $a_e > r_\beta(1 + \sin\gamma_o)$ 时, 前刀面(平面)参与切削, 切削力线性增加; 这与文献⁽⁷⁾的实验结果相吻合。



图八 后刀面受力分析



图九 切削力与切削厚度的关系

三、结 束 语

本文将普通切削的理论推广到超精密切削中, 把刀尖、前后刀面、剪切面等概念扩展了, 建立了超精密切削模型, 并推出该切削模型的力学关系。它与现有的切削理论形成了一个统一的整体。当然, 同普通切削模型一样, 两者都局限于简化的力学描述和几何描述。实际的金属切削过程是一个复杂的物理(甚至伴随着化学变化)过程。任何切削模型和具体切削实际的符合程度如何, 可借切削试验来检验。这正是我们下一步要做的工作。

参 考 文 献

1. M. E. Merchant, Mechanics of the Metal Cutting Process, Journal of Applied Physics, 1945. pp. 267—275, 318—324.
2. E. H. Lee and B. W. Shaffer, Theory of Plasticity Applied to the Problem of Maching, Journal of Applied Mechanics, 1951.
3. P. L. B. Oxley, A Strain Hardening Solution for the Shear Angle in Orthogonal Metal Cutting, Int. J. Mech. Sci., 1961.
4. 周泽华主编. 金属切削原理. 上海: 上海科技出版社, 1984
5. 熊顺和. 超精密切削力与切削机理的研究. 华中工学院硕士论文, 1987.
6. 小野浩二等著(日)理论切削学. 高希正、刘德忠译. 北京: 国防工业出版社, 1985.
7. 臼井英治著(日)切削磨削加工学. 高希正、刘德忠译. 北京: 机械工业出版社, 1982.

On the Model of Ultra—Precision Metal Cutting

Xiong Shunhe He Youyi Li Xianming

ABSTRACT

In this paper, a model of ultra—precision metal cutting, which is based on the famous less and shaffer's model of metal cutting, is proposed for the first time model turning is developed. The model describes the tool edge, tool face, shear angle, the calculation of cutting forces involved, etc, in ultra—precision metal cutting process. A comparative analysis is properly made between the el and shaffer's model of metal cutting and the proposed model of ultra-precision metal cutting.