

⑮  
83-88

# 带圆弧型卷屑槽刀具的 直角干切削动态传热模型

## Dynamic Heat Transfer Models with Grooved Tools in Orthogonal Dry Cutting

TG 501.4

康戈文<sup>①</sup>  
Kang Gewen

刘飞<sup>②</sup>  
Liu Fei

徐宗俊<sup>②</sup>  
Xu Zongjun

(① 四川联合大学机械系, 成都, 610065; ② 重庆大学机械一系; 第一作者 29 岁, 男, 博士生)

**摘要** 分析了带圆弧型卷屑槽刀具在正交干切削加工过程中切削热的产生及分布, 建立了剪切功分析模型和切屑动态传热模型, 并结合刀具传热模型, 得出了摩擦热在切屑和刀具间的能量分配比  $R_c$  和切屑、刀具内动态温度分布的理论计算方法。

**关键词** 传热; 切削热; 切削温度

中国图书资料分类法分类号 TG501.4

刀具  
直角干切削 圆弧型卷屑槽

**ABSTRACT** This paper concerns with analysing the produce and distributions of cutting heat with grooved tools in orthogonal dry cutting. A model for analysing shear heat and another model for dynamic heat transfer of chips are set up. With the heat transfer model of tools, a procedure is proposed to calculate the temperature distributions of chips and tools, and the heat partition coefficient between the tool and the chip.

**KEYWORDS** heat transfer; cutting heat; cut temperature

## 0 引 言

切削传热直接决定了切削区的切削温度, 研究切削传热对切削刀具耐用度、加工精度、已加工表面质量等具有重要的意义。

目前为止已有许多研究者对切削传热进行了研究<sup>[1~3]</sup>, 但这些研究均是适用于平面型前刀面刀具, 如图 1(a) 所示。而实际加工中大部分刀具是带有卷屑槽或卷屑台的刀具, 如图 1(b、c、d) 所示。对于带有卷屑台的刀具, 如图 1(b), 由于其实际前刀面仍为平面, 因此其传热模型与平面型前刀面刀具相同。然而对于带圆弧型卷屑槽的刀具, 情况就不这样了。当刀具带有倒棱, 且倒棱宽度较大时, 如图 1(c), 切屑将沿倒棱流出, 倒棱实际上起了前刀面的作用, 这时的切削传热仍与平面型前刀面刀具相同; 但当刀具倒棱很窄或没有倒棱时, 切屑将

\* 收文日期 1996-03-11  
国家自然科学基金资助项目

沿着圆弧型卷屑槽流出,如图 1(d)所示,前刀面实质上是圆弧型的,此时的切削传热模型显然将不同于前者。

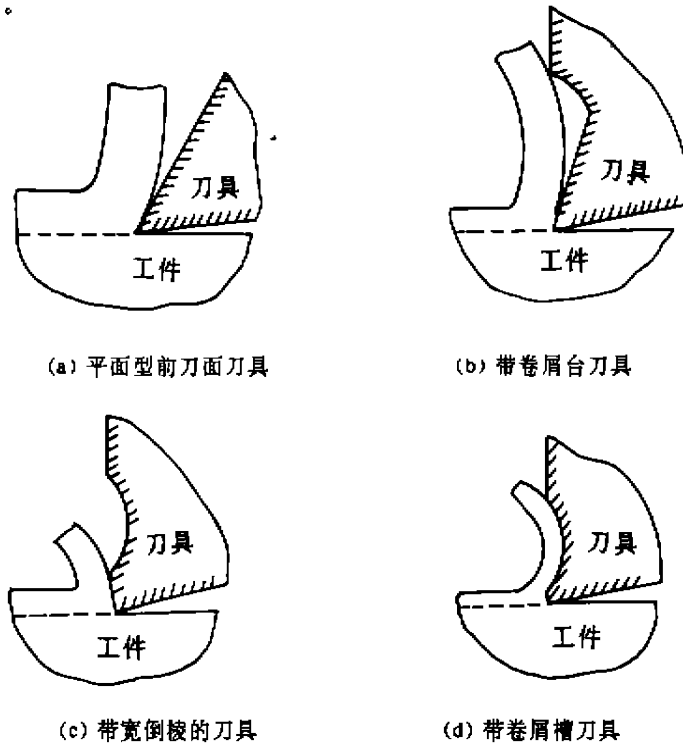


图 1 常见的几种切削形态示意图

本文建立了带圆弧型卷屑槽刀具在如图 1(d)所示切削形态下正交干切削的动态传热模型,提出了刀-屑间摩擦热分配比  $R_f$  的计算方法及切屑、刀具温度的计算公式。

## 1 切屑动态传热模型

### 1.1 切削过程分析

在切削加工过程中,切屑以一定的速率流过前刀面。对于带有圆弧型卷屑槽刀具在如图 1(d)所示的切削形态下,其切削过程如下:工件材料逐渐接近刀具刀刃,然后进入剪切区,在刀刃前强大剪应力的作用下,工件被逐渐撕裂形成切屑。随着切削过程的进行,切屑进入前刀面,沿着圆弧型卷屑槽流动,直到脱离刀具。从切削过程可看出:切屑首先从剪切区形成,与平面型前刀面刀具不同的是,切屑在流过圆弧型卷屑槽过程中,仍在不断地发生塑性变形(剪切变形),亦即圆弧型刀具的剪切区是从开始发生剪切变形面一直到切屑脱离刀具处截面的整个刀/屑接触区切屑内。

### 1.2 剪切功分析模型

由于带圆弧型卷屑槽刀具在切削加工中的剪切变形是在整个刀/屑接触面范围内逐渐发生的,因此其剪切热则分布在整個剪切变形区。

根据带圆弧型卷屑槽刀具切削加工中切屑变形的特点,可将其剪切变形分为两个阶段:1)在刀具刀尖部分发生的剪切变形;2)在圆弧型卷屑槽内发生的剪切变形。现将这两个阶段剪切功的特点分述如下:

1) 刀尖处的剪切变形。这一阶段的切屑变形,可认为等效于一个过圆弧起点线的切面为前刀面的平面型前刀面刀具所加工的切屑,如图2(b)所示,图2(a)中AA'为切面,图2(b)中AA'为刀具前刀面。此阶段的剪切功与图2(b)相同,可认为其产生在切屑形成初期的一段剪切区内。

2) 在刀具圆弧型卷屑槽内发生的剪切变形。此阶段,切屑沿着圆弧型槽流动,直到圆弧终点线脱离刀具。脱离刀具时的切屑运动方向,为过圆弧终点B的切面BB'。当切屑从A流到B过程中,切屑逐渐发生剪切变形。其剪切功的大小可认为等效于以AA'为切削方向,BB'为刀具前刀面的平面型前刀面刀具的切削加工剪切功,如图2(c)所示。等效加工的刀具前角为 $\left(\frac{\pi}{2}-\varphi_0\right)$ , $\varphi_0$ 为刀具圆弧型卷屑槽的弧度。这部分剪切功分布在整个圆弧型卷屑槽的刀-屑接触区的切屑内。

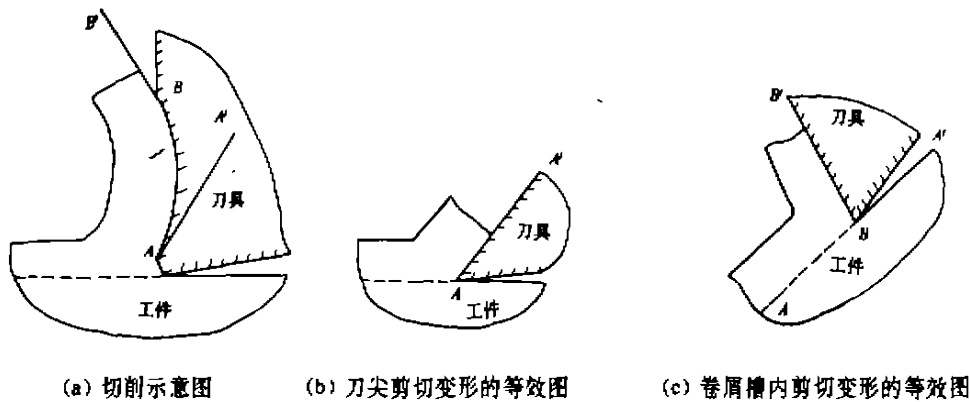


图2 剪切功分析模型

### 1.3 切屑动态传热模型的建立

切削加工过程中,切屑从脱离工件材料开始就不断发生剪切变形,直到脱离刀具。剪切变形所产生的剪切热的绝大部分将由切屑的运动带走,其余部分将传给工件、周围介质、切削液的刀具。若以刀具为参考坐标系来看,即为剪切区不断产生热量,切屑又不断带走热量的热量动平衡过程。切屑运动过程中同时与前刀面摩擦,产生摩擦热,摩擦热不断传入刀具和切屑,传入刀具部分热量致使刀具温度上升,而传入切屑的热量则不断由切屑带走,使切屑温度上升,这样又形成一个热量动平衡过程。

对于正交干切削,由于切屑厚度远小于切屑卷曲的曲率半径,因此可近似处理将圆弧形切屑模拟展开成直线,如图3所示。取切屑—工件交界面处的一个垂直于前刀面的平面作为模型的 $y=0$ 面,此面的温度可认为恒为工件温度;取刀-屑脱离处的截面为 $y=b$ 面,由文献[1,2]知此面处沿 $y$ 方向温度变化不大,即近似有 $\left.\frac{\partial T}{\partial y}\right|_{y=b}=0$ , $T$ 为切屑温度;

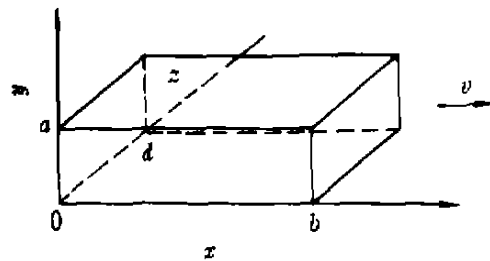


图3 切屑传热模型

刀-屑摩擦面为 $z=0$ 面;切屑上表面为 $z=a$ 面。可认为切屑在宽度方向( $z$ 向)尺寸保持

不变,且温度无变化,这样就可将三维问题转化为二维问题。

切屑传热是运动物体导热,符合运动物体导热微分方程。对如图3所示模型,其导热方程为:

$$\frac{1}{a} \left( \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\Phi}{\lambda} + \frac{q_v}{\lambda} \quad (1)$$

式中  $t$ ——时间;  $\alpha$ ——导温系数;  $v$ ——切屑速率;  
 $\lambda$ ——热扩散系数;  $\Phi$ ——耗散函数;  $q_v$ ——内热源。

### 1.3.1 内热源 $q_v$ 和耗散函数 $\Phi$

本模型的  $\Phi$  来源于第一阶段剪切变形产生的  $\Phi_1$  和第二阶段剪切变形产生的  $\Phi_2$ 。为方便求解,将刀-屑接触面上的摩擦热传入切屑部分作为模型的内热源  $q_v$ 。因此,有:

$$\Phi_1 = \begin{cases} P_{s1}R_s/(acd) & 0 < x < a, 0 < y < c \\ 0 & \text{其余(非剪切区)} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $P_{s1}$ ——第一阶段剪切功,其计算见附录

$R_s$ ——第一阶段剪切功传入切屑的比例

$c$ ——第一阶段剪切变形区尺寸

$$\Phi_2 = P_{s2}/(abd) \quad 0 < x < a, 0 < y < b \quad (3)$$

式中  $P_{s2}$ ——第二阶段剪切功,其计算见附录

刀-屑摩擦热可认为其均匀分布在切屑下表面的一薄层内,假定薄层厚度为  $e$ ,则

$$q_v = \begin{cases} P_f R_f/(ebd) & 0 < x < e, 0 < y < b \\ 0 & \text{其余} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $P_f$ ——刀-屑摩擦功;  $R_f$ ——摩擦功传入切屑的比例。

因此,切屑内有:  $\Phi + q_v = \Phi_1 + \Phi_2 + q_v$  (5)

### 1.3.2 边界条件

假定切屑、刀具与周围介质的辐射传热忽略不计,无切削液作用,在以上所建模型和耗散函数  $\Phi$ 、内热源  $q_v$  下,模型的边界条件如下: 1)  $0 < x < a, y = 0$  面:

$$T = T_0 \quad (6)$$

2)  $0 < x < a, y = b$  面:  $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$  (7)

3)  $x = 0, 0 < y < b$  面:

由于摩擦热已作为内热源,因此有:  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$  (8)

4)  $x = a, 0 < y < b$  面:  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$  (9)

### 1.3.3 初始条件

$$T(x, y, 0) = F_c(x, y) \quad t = 0 \quad (10)$$

## 1.2 切屑传热模型的求解

首先作变换  $T(x, y, t) = W(x, y, t) \exp\left[\frac{v}{2a}y - \frac{v^2}{4a}t\right]$  (11)

将式(11)代入式(1)、(6)~(10),分别得到:

$$\frac{\partial W}{\partial x} = a \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) + \frac{\alpha}{\lambda} G \quad (12)$$

式中  $G = (\Phi_1 + \Phi_2 + q_v) \exp\left[-\frac{v}{2a}y + \frac{v^2}{4a}t\right]$  (13)

边界条件变为:

1)  $0 < x < a, y = 0$  面:

$$W = T_0 \exp\left[-\frac{v}{2a}y + \frac{v^2}{4a}t\right] = W_0(y, t) \quad (14)$$

2)  $0 < x < a, y = b$  面:

$$\lambda \frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\lambda v}{2a} W = 0 \quad (15)$$

3)  $x = 0, 0 < y < b$  面:

$$\lambda \frac{\partial W}{\partial x} = 0 \quad (16)$$

4)  $x = a, 0 < y < b$  面:

$$\lambda \frac{\partial W}{\partial x} = 0 \quad (17)$$

初始条件变为:

$$W(x, y, 0) = F_c(x, y) \exp\left[-\frac{v}{2a}y\right] = F'(x, y) \quad (18)$$

对式(12)~(18)问题可用格林函数法求得其解。以上问题的格林函数  $\theta_c$  为:

$$\theta_c(x, y, t | x', y', \tau) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-s(\alpha_m^2 + \gamma_n^2)(t-\tau)} \cdot \frac{4}{b} \cdot \frac{\gamma_n^2 + \left(\frac{v}{2a}\right)^2}{b \left[ \gamma_n^2 + \left(\frac{v}{2a}\right)^2 \right] + \frac{v}{2a}} \cdot \cos \beta_m x \sin \gamma_n y \cos \beta_m x' \sin \gamma_n y' \quad (19)$$

式中

$$\beta_m = \frac{m\pi}{b}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (20)$$

$\gamma_n$  为下述方程的正根:

$$\gamma_n \cot(\gamma_n b) = \frac{v}{2a} \quad (21)$$

问题式(12)~(18)的解为:

$$\begin{aligned} W(x, y, t) = & \int_0^t \int_0^b \theta_c(x, y, t | x', y', \tau) |_{r=0} F'(x', y') dx' dy' \\ & + \frac{a}{\lambda} \int_{\tau=0}^t d\tau \int_0^a \int_0^b \theta_a(x, y, t | x', y', \tau) G(x', y', \tau) dx' dy' \\ & + \frac{a}{\lambda} \int_{\tau=0}^t d\tau \int_0^a \theta_o(x, y, t | x', y', \tau) |_{r=0} W_0(y, t) dx' \end{aligned} \quad (22)$$

将式(22)代入式(11),即可求得原问题式(1),(6)~(10)问题的解。

## 2 刀/屑能量分配比 $R_f$

切削加工过程中,刀具-切屑接触面上对应刀具和切屑各点的温度应相等。所以在整个刀-屑接触面两者的平均温度应相等。

切屑前刀面摩擦面平均温度:

$$\bar{T}_{chip} = \frac{1}{b} \int_{y=0}^b (T(0, y, t))_{chip} dy \quad (23)$$

刀具前刀面摩擦平均温度:

$$\bar{T}_{\text{tool}} = \frac{1}{bd} \int_{y=0}^b \int_{z=0}^d (T(0, y, z, t))_{\text{tool}} dy dz \quad (24)$$

式中  $(T(0, y, z, t))_{\text{tool}}$  求法可参考上文。

所以 
$$\bar{T}_{\text{chip}} = \bar{T}_{\text{tool}} \quad (25)$$

由式(25)可求出  $R_f-t$  曲线,进而可求出切屑、刀具的动态温度场。

### 3 结 论

1) 带圆弧型卷屑槽刀具切削加工中的剪切变形可分为刀尖部分剪切变形和圆弧型卷屑槽内的剪切变形,剪切区位于整个刀—屑接触区的切屑内。

2) 由本文所建模型可求出带圆弧型卷屑槽刀具的刀—屑摩擦热分配比  $R_f$ 。由  $R_f$  值进而可求出切屑、刀具的动态温度场。

### 参 考 文 献

- 1 Young H T et. al. On the analysis of chip temperature distribution in orthogonal machining. Int. J. Mach. Tools Manufact. 1994, 34(1), 73~84
- 2 Tay A O et. al. A Numerical method for calculating temperature distributions in machining from force and shear angle measurement. Int. J. Mach. Tool Des. Res. 1976, 16, 335~249
- 3 Stephenson D A. Assessment of steady-state metal cutting temperature models based on simultaneous infrared and thermocouple data. J. of Eng. for Ind. -Trans. ASME, 1991, 113(5), 121~128

### 附 录 切 削 参 量 间 相 互 关 系

对如图所示正交切削,存在下列关系:

$$A_c = a_c d$$

式中  $a_c$ ——切削深度

$d$ ——切削宽度

$$A_s = A_c / \sin \varphi$$

$A_s$ ——剪切面面积

$$v_s = \frac{\cos \gamma_0 v_{\text{cut}}}{\cos(\varphi - \gamma_0)}$$

式中  $v_s$ ——剪切速度

$v_{\text{cut}}$ ——切削速度

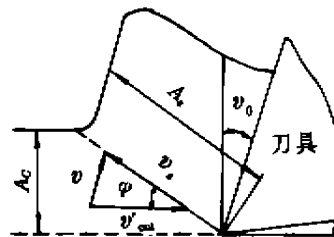
$$v = \frac{\sin \varphi v_{\text{cut}}}{\cos(\varphi - \gamma_0)}$$

式中  $v$ ——切屑流速

$$P_s = F_s v_s = \tau_s A_s v_s$$

式中  $\tau_s$ ——工件材料的剪切强度

$P_s$ ——剪切功



附图 正交切削图