

# 正交切削刀具应力的有限元分析

李海宁<sup>1</sup>, 单晨伟<sup>2</sup>, 蔺小军<sup>2</sup>

(1. 西安航空发动机(集团)有限公司, 陕西 西安 710021;

2 西北工业大学 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 陕西 西安 710072)



**摘要:**应用有限元方法计算了正交切削刀具的应力。对正剪切和负剪切的应力分布进行了比较, 分析了负剪切易引起刀具破损的原因; 对刀具前角分别为  $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$  时的等效应力进行了对比, 分析了刀具前角变化对刀具强度的影响。

**关键词:**有限元; 正交切削; 刀具; 应力

中图分类号: O242.21

文献标识码: A

文章编号: 1671-654X(2008)01-0016-03

## 引言

金属切削加工, 是为了保证零件高质量和提高劳动生产率所广泛采用的工艺过程。为了生产出低成本、高质量的产品, 各个厂家纷纷使用各种类型的数控机床、加工中心等高新设备。它们的使用效果, 与刀具工作的可靠性有密切的关系。金属加工企业的统计资料表明, 大约 30~50% 的刀具, 特别是硬质合金刀具, 是由于破损而导致不能继续使用<sup>[1]</sup>。况且由于刀具的破损会造成零件报废, 直接影响产品的成本。所以对刀具的破损作出准确的预测显得尤为重要。

分析计算刀具的应力分布就成为了一个重要的研究课题。由于金属切削过程的复杂性, 一般都从正交切削入手, 然后扩大到非正交切削。本文应用有限元方法对正交切削刀具的应力进行了分析。

## 1 有限元分析初始条件的确定

### 1.1 刀-屑接触长度 $L$ 的确定

刀-屑接触长度  $L$  对切削过程有很大影响。对接触长度产生影响的因素比较多, 其中切削速度、刀具前角、切削厚度、润滑剂等因素的影响, 已经有了研究成果。在这里采用中山一雄<sup>[2]</sup>计算接触长度的实验公式来计算。式中  $a_c$  为切削厚度,  $k_m$  为外观接触长度和理论接触长度之比。

$$L = k_m \frac{a_c \sin(\phi + \alpha)}{\sin\phi \cos\alpha} \quad (1)$$

刀-屑接触长度  $L$  等于紧密型接触区长度  $l_1$  和峰点型接触长度  $l_2$  之和, 即

$$L = l_1 + l_2 \quad (2)$$

根据参考资料 [3], 在这里假设  $l_1 = l_2$ 。

### 1.2 前刀面和后刀面上的主应力、剪应力分布

根据 Primos, Kathwinkel 和 Wright 等人的研究结果<sup>[3]</sup> (如图 1 所示):

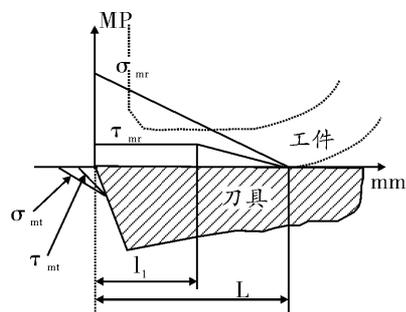


图 1 前、后刀面主应力、剪应力分布

前刀面上最大正应力在刀刃处, 正应力在刀-屑接触长度范围内由最大值  $\sigma_{mr}$  线性减小到零, 在刀-屑分离点处以后正应力为零;

前刀面上的剪应力在紧密型接触区长度  $l_1$  内保持不变, 而且为最大值。在峰点型接触长度  $l_2$  内线性减小, 在刀-屑分离点处以后剪应力为 0;

后刀面上的正应力和剪应力与刀具的磨损有关。如有磨损, 正应力和剪应力在刀刃处最大, 在磨损范围内线性减小到 0。

前刀面和后刀面上的最大正应力、剪应力分别按照公式 (3)、(4)、(5)、(6) 来计算<sup>[3]</sup>:

$$\sigma_{mr} = \frac{2F_z}{a_c L} \quad (3)$$

收稿日期: 2007-12-02 修订日期: 2007-12-25

作者简介: 李海宁 (1961 - ), 男, 陕西扶风人, 研究员, 研究方向为机械电子工程, 企业生产管理。

$$m_r = \frac{2F_x}{\cos \alpha \cdot (1 + l_1/L) \cdot a_w L} \tag{4}$$

$$m_r = 2F_y/A \tag{5}$$

$$m_r = 2\mu F_y/A \tag{6}$$

式中： $F_z$ 、 $F_y$ 、 $F_x$  分别为主切削力、切深抗力、进给抗力； $a_w$  为切削宽度； $L$  为刀 - 屑接触长度； $L_1$  为刀 - 屑紧密型接触区长度； $\alpha$  为切屑流出方向； $\mu$  为后刀面上的摩擦系数； $A$  为后刀面的磨损面积。

### 2 模型的建立

刀具在切削加工时,是一个复杂的三维问题,为了便于计算和分析,在这里只讨论正交切削,而且限制在二维。刀具在使用中既有弹性变形,又有塑性变形。由于切削温度较高,在高温作用下,刀具材料的物理机械性能参数,如弹性模量  $E$ 、导热系数、强度极限  $\sigma_b$ 、屈服极限  $\sigma_s$  等会有较大得变化,从而影响刀具的强度。

为了简化计算,在用有限元分析正交切削刀具的应力时做了以下假设:

- 1) 刀具材料连续、均匀,具有各项同性;
- 2) 刀具受力变形模型为理想弹塑性线性强化模型;
- 3) 刀具材料的屈服满足米赛斯屈服准则。

### 3 计算结果和分析

#### 3.1 计算条件

刀具采用硬质合金焊接车刀,刀片材料为 YT15 (密度 :  $14.3 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ,泊松比  $\mu: 0.21$ ,弹性模量  $E: 620 \text{GP}$ ,抗弯强度 :  $1500 \text{MP}$ ,抗压强度 :  $3500 \text{MP}$ ),刀杆为中碳钢。刀具后角  $\alpha_o = 8^\circ$ ;主偏角  $\alpha_r = 45^\circ$ ;刃倾角  $\alpha_s = 0^\circ$ ;切削速度  $V = 1.67 \text{m/s}$ ,走刀量  $f = 0.47 \text{mm/r}$ ,切削深度  $a_p = 3.4 \text{mm}$ ,切削宽度  $a_w = 2 \text{mm}$ 。工件材料为中碳钢。刀具后刀面有磨损  $VB = 0.2 \text{mm}$ 。按照正常切削加工状态,前刀面上有主切削力和刀屑的摩擦力(方向指向刀具根部),后刀面上有进给力和摩擦力(方向指向刀具的下方)。

#### 3.2 计算结果与分析

##### 3.2.1 正剪切切削

计算的刀头部分(刀具前角  $\alpha_o = 0^\circ$ )的等效应力如图 2,在刀刃处等效应力最大,达到  $1.263 \text{GP}$ ,在刀刃附近发生塑性破损的可能性最大。离切削刃越远,等效应力的值越小。刀头部分(刀具前角  $\alpha_o = 0^\circ$ )最大主应力分布图如图 3,从图中可以看到,刀刃部分没有拉应力,最大拉应力出现在距刀刃有两个刀屑接触长度  $L$  的地方。最大值为  $375 \text{MP}$ ,远低于硬质合金的抗弯强度,可见在稳定的切削加工过程中,很难发生脆性破损。图 4 表示的是最小主应力(刀具前角  $\alpha_o = 0^\circ$ ),

在切削刃附近最大,压应力最大值达到  $1.286 \text{GP}$ 。离切削刃越远,压应力值越小。由于切削刃附近的最大主应力和最小主应力相差甚大,使切削刃附近作用的最大剪应力值很大。图 5 表示的是最大剪应力(刀具前角  $\alpha_o = 0^\circ$ ),切削刃附近可达  $402 \text{MP}$ 。

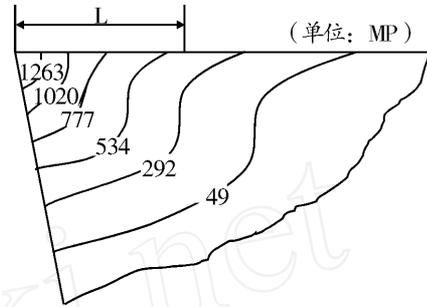


图 2 等效应力分布图

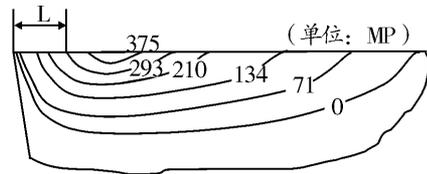


图 3 最大主应力分布图

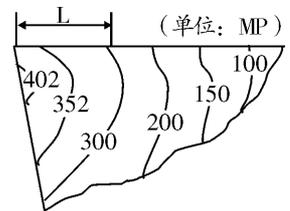
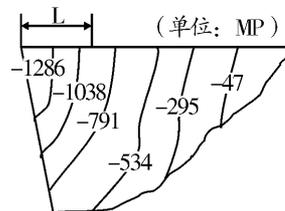


图 4 最小主应力分布图 图 5 最大剪应力分布图

##### 3.2.2 负剪切切削

刀具在切削加工时,在切出的瞬间,当切到工件的末端时,常常会将工件多切去一些,使工件形成一个倒角。在这种情况下,刀具往往容易破损。这是由于负剪切的缘故。当刀具快到达切出边时,剪切方向已由原来的从切削刃向加工方向向待加工表面方向,转成从切削刃向工件深处的方向,即从正剪切转成了负剪切。当发生负剪切时,剪切方向和切屑流出方向随之改变,前刀面受主切削力和摩擦力,但摩擦力的方向由指向刀具根部改变为指向刀刃,后刀面则不受力。图 6 是模拟刀具(刀具前角  $\alpha_o = 0^\circ$ )负剪切获得的最大主应力分布图。从图中可以看出,最大拉应力的值达到了  $1.491 \text{GP}$ ,其位置更加接近刀刃。而正常切削加工时仅仅只有  $375 \text{MP}$ 。从这里就可以解释为什么负剪切时容易引起刀具刃口的破损。

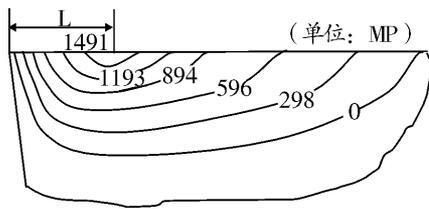


图 6 最大主应力分布图

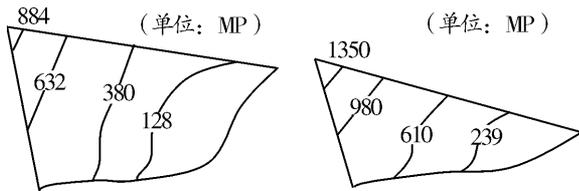


图 7 前角  $\phi = 10^\circ$  时等效应力分布图      图 8 前角  $\phi = 15^\circ$  时等效应力分布图

刀具前角 $\phi$	刀刃部分最大等效应力 (MP)
$0^\circ$	1263
$10^\circ$	884
$15^\circ$	1350

### 3.2.3 刀具前角变化对刀具强度的影响

图 7和图 8是刀具前角  $\phi$  分别为  $10^\circ$ 、 $15^\circ$  (其它条件和图 2一样)时计算的等效应力。下表列出了  $\phi$  分别为  $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$  时计算的刀刃部分最大等效应力值。从表中可以看出,当  $\phi = 15^\circ$  时,在临近切削刃处其等效应力最大,达到 1350MP。当  $\phi = 10^\circ$  时,等效应力最小,为 884MP。而当  $\phi = 0^\circ$  时,其等效应力介于两者之间。从中可以发现,刀具的前角过大或过小,

都会影响刀具的强度。可见,有限元法可以确定刀具的合理前角。

### 参考文献:

- [1] B A 奥斯塔费耶夫. 刀具动态强度计算 [M]. 北京:机械工业出版社, 1982
- [2] 中山一雄. 金属切削加工理论 [M]. 北京:机械工业出版社, 1982
- [3] Younis Mechanical and Thermal Stresses in Clamped, Brazed and Bonded Carbide Tools[J]. Journal of Engineering for industry, 1992, 114-337.
- [4] Bert J Shih Finite Element Analysis the Rake Angle Effects in Orthogonal Metal Cutting[J]. J. Mech. Sci. 1996, 38(1).
- [5] Tyan, Wei Hang Analysis of Orthogonal Metal Cutting Processes[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1992, 34: 365 - 389.
- [6] Ert J Shih, Henry T Y Yang Experimental and Finite Element Predictions of Residual Stresses Due to Orthogonal Metal Cutting[J]. International Journal for numerical Methods in Engineering 1993, 36: 1487 - 1570.
- [7] J Shih Finite Element Simulation of Orthogonal Metal Cutting [J]. Transactions of the ASME, 1995, 84: 117.
- [8] Komvopoulos SA Epenbeck Finite Element Modeling of Orthogonal Metal Cutting[J]. Journal of Engineering for industry AUGUST, 1991, 113: 253.
- [9] Thusty Z Masood Chipping and Breakage of Carbide Tools [J]. Journal of Engineering for industry, 1978, 100: 403.
- [10] Strenkowski J T Carroll, III, A finite element Model of Orthogonal Metal Cutting [J]. Journal of Engineering for Industry, NOVEMBER, 1985, 107: 349.

## Analyzing Stresses of Orthogonal Metal Cutting Tool by FEM

L I Ha i-n i ng<sup>1</sup>, SHAN Chen-wei<sup>2</sup>, L IN Xiao-jun<sup>2</sup>

(1. Xi an Aero-engine (Group) LTD, Xi an 710021, China;

2 The Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology of Ministry of Education, Northwestem Polytechnical University, Xi an 710072, China)

**Abstract:** The stresses of orthogonal metal cutting tool are estimated by using FEM. The calculated stresses in cutting tool and the relation between stresses and breakage are discussed. This paper gives a detailed analysis of the reason why the cutting tool working in negatively sheared cutting condition is easy to cause chipping and breakage. The rake angle effects to tool strength in cutting processes are also analyzed in particular.

**Key words:** FEM; orthogonal metal cutting; cutting tool; stress