

# 陶瓷材料二元切削机理的 有限元解析

张德贤 江祖发 沈沛如

(机械系)

**提 要:** 本文根据断裂力学理论, 利用有限元法计算了刃削区的应力分布, 并求出了裂纹的扩展路线。计算分析结果与实验基本相符, 这些分析结果加深了对陶瓷材料切屑形成机理的认识。

**关键词:** 陶瓷材料, 二元切削, 有限元法。

切削加工中切屑的形成机理主要与材料发生破坏时的力学状态有关。切削过程中的各因素也主要通过影响切削区的应力大小及其分布而影响切削过程。因此, 对切削区应力状态的认识涉及切屑形成过程根本问题, 具有重要的理论意义与实践意义。要知道切削区的应力状态, 必须对各种切削条件下切削区的应力场进行解析。由于切削过程中切削区边界条件的复杂性及实验困难, 对切削区应力分布进行完全的数学解析是难以实现的。因此就不得不依赖于电子计算机的数值解析法。在数值解析法中, 最有效的手段是有限元法, 尽管有限元法需要较大的计算量, 但随着计算机的大型化和高速化而增加了其实用价值。本文就是根据断裂力学理论, 采用有限元数值解析与实验观察相结合的方法对陶瓷材料的切屑形成过程进行了分析, 从而加深了对陶瓷材料切削机理的认识。

## 1 断裂准则的确定

近年来, 随着断裂力学的发展, 逐步弄清了脆性破坏条件的基本问题, 提出了许多作为发生破坏的应力条件的准则。根据陶瓷材料的组织结构、力学特性及切削加工的具体条件, 我们认为, 在陶瓷材料切削中, 由拉应力引起断裂时, 近似满足资料[1]中 Paul 等所提出的断裂准则。其基本假设如下:

- ①材料内部包含扁平椭球形微缺陷。
- ②材料是各向同性: 连续的线弹性体。
- ③当最大应力达到临界值时, 材料发生断裂, 此临界值是材料的一个特性常数。
- ④在荷载作用下, 扁椭球形微缺陷的面将不会相互接触。
- ⑤缺陷相互具有一定距离, 且各个均与边界距有一定的距离。
- ⑥此断裂准则仅适合于断裂的开始。

---

①收到日期: 1989.02.24

资料[1], Paul 等所提出的断裂条件是:

当  $\sigma_3 / st < 1 - N_1^2$  时:

$$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{st}\right)^2 + 2N_1\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{st}\right) + N_1^2(N_1^2 - 4) = 0 \quad (1)$$

当  $\sigma_3 / st \geq 1 - N_1^2$  时:

$$\sigma_1 / st = 1 \quad (2)$$

式中  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  分别最大及最小主应力,  $st$  是材料的抗拉强度,  $N_1$  是由材料内部所含扁平椭圆形缺陷的最长径、中间径及泊松比所决定的常数。

如果考虑材料的抗压强度  $C_t$ , 令  $\sigma_1 = 0$ ,  $\sigma_3 = -C_t$ , 则由(1)式得:

$$\left(\frac{C_t}{S_t}\right)^2 - 2N_1\left(\frac{C_t}{S_t}\right) + N_1^2(N_1^2 - 4) = 0 \quad (3)$$

由(3)式可以推出:

$$N_1 = \sqrt{2 + C_t / S_t - 2\sqrt{1 + \frac{C_t}{S_t}}} \quad (4)$$

(4)式即为计算  $N_1$  值的公式。

由(1)及(2)式可以解出  $S_t$ , 则有:

当  $\sigma_3 / S_t < 1 - N_1^2$  时

$$S_t = \frac{N_1(\sigma_1 + \sigma_3) + 2\sqrt{N_1^2\sigma_1\sigma_3 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}}{N_1(4 - N_1^2)} \quad (5)$$

当  $\sigma_3 / S_t \geq 1 - N_1^2$  时

$$S_t = \sigma_1 \quad (6)$$

(5)式及(6)式表示材料发生断裂破坏时, 断裂处材料的应力状态所满足的条件。我们可以将公式右端看成是断裂处应力状态的等效应力, 此等效应力一旦等于单向抗拉强度  $S_t$  时, 材料将发生断裂破坏。即断裂等效应力可表示为:

当  $\sigma_3 / \sigma_1 < 1 - N_1^2$  时

$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{N_1(\sigma_1 + \sigma_3) + 2\sqrt{N_1^2\sigma_1\sigma_3 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}}{N_1(4 - N_1^2)} \quad (7)$$

当  $\sigma_3 / \sigma_1 \geq 1 - N_1^2$  时

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma_1 \quad (8)$$

(7)式及(8)式就是在拉应力引起断裂时, 计算切削区等效应力分布的计算公式。

上述理论是以材料在受力过程中, 裂隙张开而不闭合为前提的, 这种断裂条件较适合于拉应力占优势的情形。而在压应力占优势时, 材料在受力过程中, 裂隙往往会发生闭合, 闭合后的裂隙将会在一定长度上均匀接触, 并能传递正应力和剪应力。在这种情况下, 正应力将不在裂纹缝端引起应力集中, 只有剪应力才引起缝端应力集中。根据资料

[2], Meclintock 等人考虑了这一影响后, 提出了称为修正格里菲斯(Griffith)理论。其断裂条件如下:

$$\sigma_1(\sqrt{f^2 + 1} + f) - \sigma_3(\sqrt{f^2 + 1} - f) = 4S_t \quad (9)$$

式中  $f = \tan \phi$  为材料的内摩擦系数。解(9)式可得:

$$S_t = [\sigma_1(\sqrt{f^2 + 1} + f) - \sigma_3(\sqrt{f^2 + 1} - f)] / 4 \quad (10)$$

我们仍可将(10)式的右端看作为压应力占优势时, 断裂应力场的等效应力, 此等效应力一旦等于材料抗拉强度时将发生断裂破坏, 故由剪应力引起断裂时, 切削区等效应力可表示为:

$$\sigma_{\text{eff}} = [\sigma_1(\sqrt{f^2 + 1} + f) - \sigma_3(\sqrt{f^2 + 1} - f)] / 4 \quad (11)$$

根据资料[3], 裂纹的扩展路线可由下述方法确定: 裂纹首先在应力场中的最大等效应力处产生, 由此点出发, 在等效应力场中, 裂纹将沿着最小梯度的方向扩展。

## 2 切削区应力场有限元解析的处理方法

2.1 取有限元解析模型如图1所示, ab、bc、af 是三条固定边界, cd 边是刀具和切屑接触的边界。根据不同的切削条件, 改变刀具前角  $\gamma_0$  和切削厚度  $a_c$  的值, 便可得到各种不同的切削条件下的有限元解析模型。

由于切削区是高应力集中区, 切削过程中的一切现象均在小的刃前区内发生。故我们所取的模型尺寸均在1毫米之内。

图2~3是本文有限元解析的网格划分模型。这些模型的网格处理工作由我们自编的任意平面区域的网格自动生成程序完成。

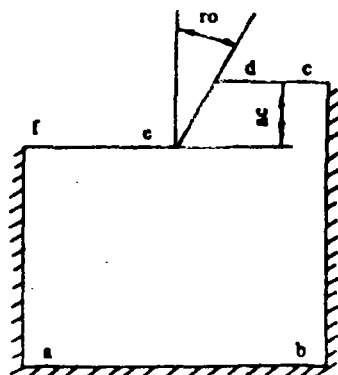


图1 有限元解析的模型

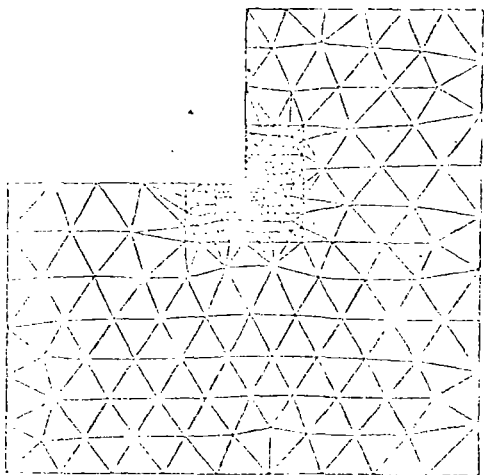


图2 网格划分模型

$\gamma_0 = 0^\circ$   $a_c = 0.3$  毫米 节点数 316 单元数 517

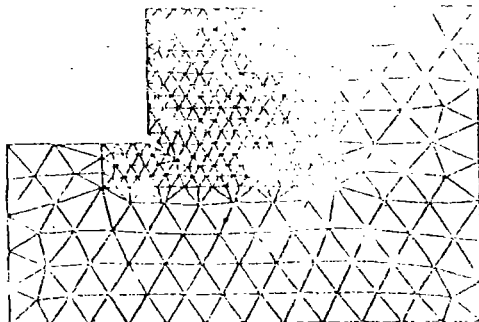


图3 网格划分模型

$\gamma_0 = 0^\circ$   $a_c = 0.3$  毫米  
节点数 345 单元数 628

## 2.2 刀—屑边界条件的处理

在切削过程中, 刀具是通过前刀面挤压被切削层材料而生成切屑的。因此, 刀—屑接触节点的水平位移  $u_i$  可按图 4 计算, 设刀具水平移动量为  $S$ , 则节点  $i$  的水平位移  $u_i$  为:

$$u_i = S - v_i \tan \gamma_0 \quad (12)$$

式中  $v_i$  是节点  $i$  的垂直方向的位移。

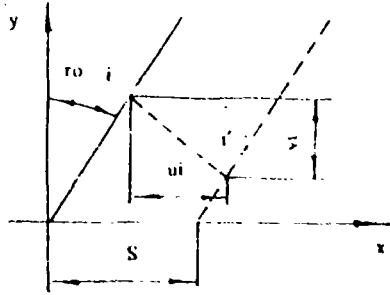


图 4 刀—屑接触节点水平位移计算

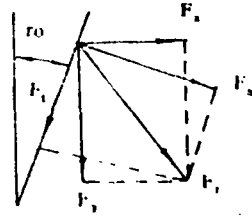


图 5 刀—屑接触节点载荷计算

为了计算刀—屑接触节点的作用力, 我们近似采用平均摩擦系数  $\mu$  来表示刀具与被切削层材料间法向作用力  $F_N$  和切向作用力  $F_t$  之间的关系, 即:

$$F_t = \mu F_N \quad (13)$$

则由图 5, 刀—屑接触节点的水平作用力  $F_x$  和垂直作用力  $F_y$  与前刀面上作用力  $F_t$  及  $F_N$  的关系为:

$$\begin{cases} F_t = F_y \cos \gamma_0 - F_x \sin \gamma_0 \\ F_N = F_y \sin \gamma_0 + F_x \cos \gamma_0 \end{cases} \quad (14)$$

将(13)式代入(14)式, 得:

$$F_y = \frac{(\mu \cos \gamma_0 + \sin \gamma_0)}{\cos \gamma_0 - \mu \sin \gamma_0} F_x \quad (15)$$

若令:

$$F_\mu = \frac{\mu \cos \gamma_0 + \sin \gamma_0}{\cos \gamma_0 - \mu \sin \gamma_0}$$

则有:

$$F_y = F_\mu \cdot F_x \quad (16)$$

## 2.3 切削区有限元解析的方法

通常三角形常应变单元的有限元解析是通过对(17)式所示的整体结构平衡方程求解, 求出各节点的位移后, 再求出各节点的应力值。

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdots \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdots \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdots \\ \vdots & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ F_{x2} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中, 方程左边的第一个矩阵是所求解结构的整体刚度矩阵, 第二个矩阵是节点的位移列阵, 方程右端的矩阵是节点载荷列阵。

在切削过程中, 切削区所受的载荷是由于刀具前刀面对其挤压而产生的, 而挤压作用力是未知的, 在这种情况下与刀具前刀面相接触节点的载荷是未知的, 其它节点的载荷均为零。因此, 可把与刀具前刀面相接触节点的水平位移作为已知量, 而把其水平方向上的载荷作为未知量, 把(12)及(16)式代入(17)式中, 即可求出各节点的位移, 以及与刀具前刀面接触节点的作用载荷。

假设第一个节点是与刀具前刀面相接触节点, 将(12)、(16)式代入(17)式则有:

$$\begin{bmatrix} -1 & K_{12} - K_{11} \tan \gamma_0 & K_{13} & \cdots \\ -F_u & K_{22} - K_{21} \tan \gamma_0 & K_{23} & \cdots \\ 0 & K_{32} - K_{31} \tan \gamma_0 & K_{33} & \cdots \\ \vdots & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{x1} \\ v_1 \\ u_2 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_{11} \cdot S \\ -K_{21} \cdot S \\ K_{x2} - K_{31} \cdot S \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (18)$$

一旦知道刀具的移动量, 就可以由(18)式求出切削区各节点的位移, 以及与前刀面接触节点的作用载荷, 从而求出切削区的应力分布。

## 2.4 有限元解析程序

本文的有限元解析均是由我们自编的切前过程模拟程序完成。该程序具有计算各种前角、各种切削厚度的切削区弹塑性应力场分布的功能, 程序编制的主要流程图如图6所示。

## 3 有限元解析结果及实验验证

### 3.1 有限元解析结果

本文以电瓷材料为试验材料来研究陶瓷材料的切削机理。这种材料化学成份是:  $\text{SiO}_2$  62~72%、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  19~23%、 $\text{R}_2\text{O}$  3.5~5%、 $\text{RO}$  3.2%、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  1%, 组织结构主要由谟来石晶体( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ )、残留石英( $\text{SiO}_2$ )、非均质的玻璃体和气孔组成。

取有限元解析的原始数据如下: 弹性模量  $E$  为  $70000\text{N/mm}^2$ , 波松比  $\mu$  为 0.25, 抗拉强度  $S_t$  为  $35\text{N/mm}^2$ , 抗压强度  $C_t$  为  $400\text{N/mm}^2$ , 前角  $\gamma_0$  为  $0^\circ$ , 切削厚度为 0.3

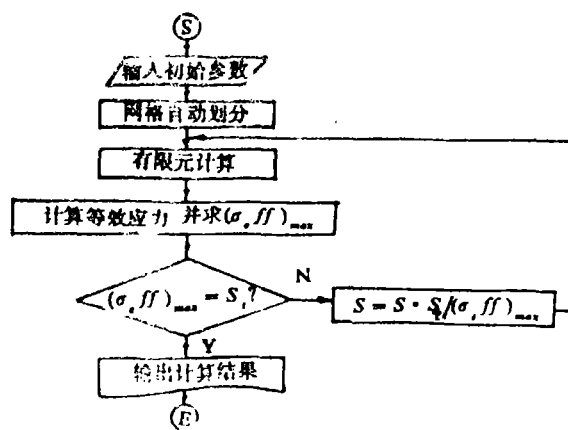


图6 切削过程模拟程序流程图

毫米。刀具和工件间的摩擦系数为 0.5, 材料内摩擦系数为 0.7, 板厚为 1 毫米、平面应变状态。

图 7、图 8 分别是由拉应力引起断裂时和由剪应力引起断裂时的等效力分布及裂纹扩展路线。

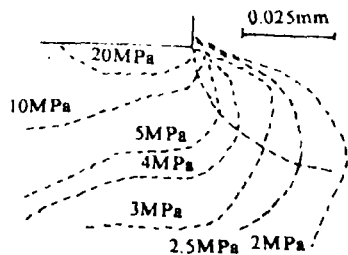


图 7 拉应力引起断裂时等效应力分布及裂纹扩展路线

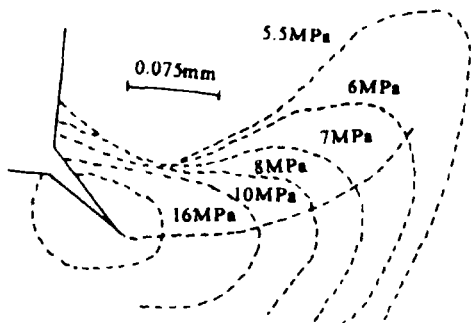


图 8 剪应力引起断裂时等效应力分布及裂纹扩展路线

由图 7、8 可以看出被切削材料在刀具的挤压作用下, 首先将产生由拉应力引起的断裂, 裂纹将由刃端出发并向刀具前下方扩展, 当裂纹扩展到一定程度后, 被切削材料将发生剪切断裂, 剪切断裂将由拉应力引起裂纹的缝端出发, 逐步地朝刀具前上方扩展, 从而形成切屑。

### 3. 2 实验验证

以电瓷材料为试验材料, 在铣床上采用低速手动进给, 在显微镜下观察其切屑形成过程, 裂纹扩展情况如图 9 所示。

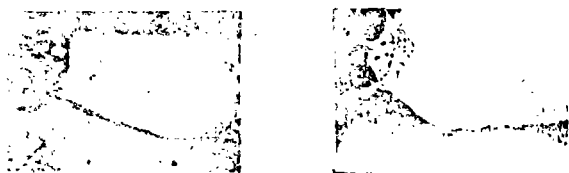


图 9 裂纹扩展情况的观察照片

(a)  $\gamma_0 = 0^\circ$  (b)  $\gamma_0 = -15^\circ$

由图 9 可以看出, 裂纹首先在刀尖处出现, 并朝刀具前下方扩展, 扩展一定长度后, 裂纹则逐渐地朝刀具前上方扩展。由此可以看出, 实验观察结果和有限元解析结果相符。

### 3. 3 切屑形成机理分析

根据有限元解析结果及实验观察, 我们提出陶瓷材料切屑形成模型如图 10 所示, 认为在材料切削加工中有两种断裂形式, 即由拉应力引起的断裂(图 10 中 ab 段)和由剪应力引起的断裂(图 10 中 bd 段)。在这二种断裂形式的作用下而形成切屑。

在拉应力引起断裂时, 裂纹将在刀尖处出现,

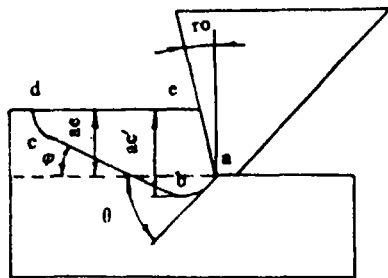


图 10 陶瓷材料切屑形成模型

并朝刀具前下方扩展。这样,当切屑形成以后,将会在已加工表面上形成较大凹坑,一方面将会有助于减少刀具和工件之间的摩擦,从而提高刀具耐用度,同时也会明显使加工表面粗糙度增大。

#### 4 主要结论

- 4.1 在陶瓷材料切屑形成过程中,有二种断裂形式,即由拉应力引起的断裂和由剪应力引起的断裂,在这二种形式断裂作用下而形成切屑。
- 4.2 在切屑形成过程中,将会在已加工表面上形成较大的凹坑,这种凹坑将会严重影响加工表面粗糙度。
- 4.3 在切削加工理论研究中,有限元法是一个有效的辅助方法。
- 4.4 陶瓷材料切削机理的研究涉及到广阔的基础科学面,有许多有待于进一步研究的问题。

#### 参 考 文 献

- 【1】 B.Paul and Mirancy. An Improved Fracture Criterion for Three-dimensional stress states. Trans, ASME, SerH 98.2 1986.159
- 【2】 肖树芳,杨淑碧. 岩体力学. 地质出版社. 1987.5
- 【3】 P.L.S. Karskir and N.J.Altiero. The Formation of chip in the penetration of Elastic-brittle Material(Rock) Trans. ASEM, SerE, 40, 3 1973.791
- 【4】 张德贤. 陶瓷材料切削机理的研究. 郑州工学院硕士毕业论文. 1988.6

### Analysis of the Mechanism of Orthogonal Cutting for Ceramic Materials by the finite Element Method

Zhang Dexian      Jiang Zufa      Shen Pciru

(Department of Mechanical Engineering)

**Abstract:** In this paper, on the basis of fracture machamics, the finite element method is employed to derive the stress distribution in the vicinity of the tool tip and to determine the approximate crack path. The results of theoretical analysis agree properly with those of the experimental obseration. These results is necessary to extrnd the understanding of the chip forming machanism for ceramic materials.

**Keywords:** ceramic materials, orthogonal cutting, finite element method