

# 梯度功能陶瓷刀具的热应力分析\*

王永国

(上海交通大学金属基复合材料国家重点实验室 上海 200030)

艾 兴 李兆前 邓建新 赵 军

(山东大学)

摘要: 运用有限元法计算了梯度功能陶瓷刀具内的热应力, 结果表明, 在切削速度较低的情况下, 梯度功能陶瓷刀具内的热应力与普通陶瓷刀具内的热应力相比差别不大; 而在高速切削条件下, 梯度功能陶瓷刀具内的热应力明显小于普通陶瓷刀具, 说明梯度功能陶瓷刀具适应于高速切削。

关键词: 梯度功能 陶瓷刀具 热应力

中图分类号: TG711

## 0 前言

普通陶瓷刀具进行切削时, 绝大部分的切削功转化为切削热, 致使工件、切屑和刀具的温度升高, 特别是高速切削条件下, 刀具前刀面的最高温度可达 1 000 °C 以上<sup>[1]</sup>。由于陶瓷刀具材料的导热性和抗热震性不高, 造成刀具内存在很高的热应力, 从而导致刀具的失效。梯度功能陶瓷刀具材料使这一问题得到了缓解<sup>[2~4]</sup>。

本文对梯度功能陶瓷刀具 FG-2 切削淬硬钢 T10A 时刀具内的热应力进行了有限元计算, 通过与普通陶瓷刀具 SG-4 内热应力的比较, 有助于增加对梯度功能陶瓷刀具应用场合的认识, 对于其推广应用具有重要的意义。

## 1 温度场和热应力计算模型

图 1 为三维温度场及热应力场计算模型。在连续切削条件下, 刀—屑接触区可看作是稳定的面热源。根据传热学, 在能量守恒条件下, 如果模型中任一单元体内部无热源, 在稳态条件下, 流入流出单元体的热量应相等, 于是热传导微分方程可表达为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(z) \frac{\partial t}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda(z) \frac{\partial t}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(z) \frac{\partial t}{\partial z} \right] = 0 \quad (1)$$

式中  $\lambda(z)$  ——  $z$  方向上的热导率

边界条件如下:

(1) 面  $BCGF$ 、 $CDGH$  和  $EFGH$  为热传导边界;

边界温度假定为 20 °C。

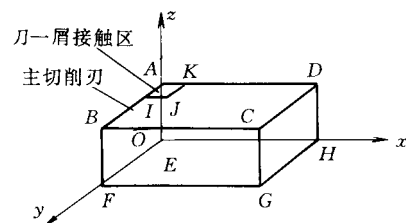


图 1 三维温度场及热应力场模型

(2) 面  $IBCDKJ$ 、 $ABFE$  及  $ADHG$  为对流边界, 即

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_r = h(t - t_{amb}) \quad (2)$$

式中  $\lambda$  —— 边界上的热导率

$t$  —— 边界上的温度

$h$  —— 表面热传递系数

$t_{amb}$  —— 周围介质温度, 假定为 20 °C

(3) 面  $AIJK$  (刀—屑接触区) —— 已知热流边界, 即

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_r = q_2 \quad (3)$$

式中  $q_2$  —— 刀—屑接触区的平均热流密度

实际计算时在前刀面刀屑接触区施加一恒定温度, 此温度的值由文献<sup>[1]</sup>得出

$$t = 389v^{0.24} f^{0.1} a_p^{0.02} \quad (4)$$

表 1 为工件材料为 T10A (硬度 59.5 HRC); 进给量  $f=0.05$  mm/r 和背吃刀量  $a_p=0.2$  mm; 切削速度分别取为  $v=50$  m/min、100 m/min、150 m/min 和 200 m/min 时梯度功能陶瓷刀具 FG-2 和普通陶瓷刀具 SG-4 的刀屑接触区的平均温度值 (假定 FG-2 也适应于式(4), 在相同切削条件下两种刀具刀屑接触

\* 国家自然科学基金资助项目(59975054)。20000623 收到初稿, 20020112 收到修改稿

于式(4),在相同切削条件下两种刀具刀屑接触区的平均温度值相同)。

表 1 各种切削速度下前刀面刀屑接触区的平均温度值

切削速度 $v/(m \cdot \min^{-1})$	50	100	150
温度 $t/^\circ\text{C}$	706.9	834.9	926.3

温度场求出后,利用下式就可求出热载荷作用下梯度功能刀具的热应力。

$$\begin{cases} \sigma_x = \lambda\theta + 2G\varepsilon_x - \beta\Delta t \\ \sigma_y = \lambda\theta + 2G\varepsilon_y - \beta\Delta t \\ \sigma_z = \lambda\theta + 2G\varepsilon_z - \beta\Delta t \\ \tau_{xy} = G\gamma_{xy} = G\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \\ \tau_{xz} = G\gamma_{xz} = G\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) \\ \tau_{yz} = G\gamma_{yz} = G\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) \end{cases} \quad (5)$$

$$\theta = \frac{1-2\nu}{E}\Theta + 3\alpha\Delta t = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$$

$$\Theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

式中  $\theta$ ——体应变

$\lambda$ ——拉梅系数

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$G$ ——切变模量

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$\beta$ ——热应力系数

$$\beta = \frac{E\alpha}{1-2\nu} = \alpha(3\lambda + 2G)$$

## 2 温度场和热应力的计算结果及分析

衡量材料破坏的理论有最大拉应力(Maxprincipal)、最大切应力(Tresca)、最大 Mises 应力及莫尔理论等。对于脆性材料的疲劳破坏宜采用最大拉应力理论及最大切应力理论;对于脆性材料的塑性破坏宜采用最大形状改变比能理论。对于梯度功能陶瓷刀具高速切削时既有由于疲劳造成的破坏,又有由于刀尖温度太高造成的塑性破坏。所以决定计算梯度功能陶瓷刀具内的最大拉应力、最大切应力及 Mises 应力。

梯度功能陶瓷刀具 FG-2 和普通陶瓷刀具 SG-4 的最大热 Mises 应力、最大热切应力及最大热拉应力如图 2~4 所示。

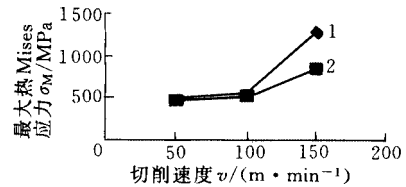


图 2 FG-2 和 SG-4 的最大热 Mises 应力和切削速度的关系曲线

1. SG-4 2. FG-2

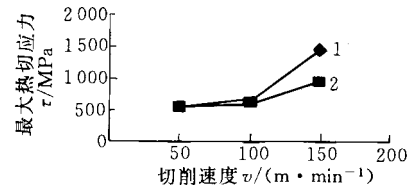


图 3 FG-2 和 SG-4 的最大热切应力和切削速度的关系曲线

1. SG-4 2. FG-2

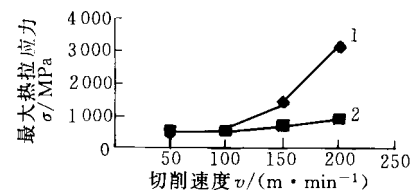


图 4 FG-2 和 SG-4 的最大热拉应力和切削速度的关系曲线

1. SG-4 2. FG-2

可以看出如下几点。

(1) 梯度功能陶瓷刀具 FG-2 内的最大热 Mises 应力、最大热切应力及最大热拉应力在相同条件下均小于普通陶瓷刀具 SG-4。

(2) FG-2 和 SG-4 刀具内的热应力随切削速度的提高而增大,且增大的幅度呈上升趋势,说明随切削速度的提高,热应力在刀具的损坏中所占的比重逐渐增大。

(3) 随切削速度的提高,梯度功能陶瓷刀具 FG-2 内的热应力与普通陶瓷刀具 SG-4 内的热应力的比值减小。各比值见表 2。

表 2 FG-2 与 SG-4 各热应力的比值

切削速度 $v/(m \cdot \min^{-1})$	50	100	150
热 Mises 应力之比	1.0	0.89	0.65
热切应力之比	1.0	0.93	0.63
热拉应力之比	1.0	0.92	0.47

由此可以得出这样的结论:梯度功能陶瓷刀具比普通陶瓷刀具更适合于高速切削。

在给定热载荷的情况下,温度场及温度梯度取决于材料的热导率、密度和比热。温度场及温度梯度确定的情况下,热应力场及热应力梯度取决于材

料的热膨胀系数、弹性模量及泊松比<sup>[5]</sup>。梯度功能陶瓷刀具, 通过合理地控制材料成分的梯度变化, 从而实现了热导率、热膨胀系数、弹性模量和泊松比等热物理性能的合理梯度变化。所以梯度功能陶瓷刀具在切削过程中刀具内的热应力得到了缓解。切削速度越高, 切削过程中产生的热量越多, 热应力缓解的程度也越大。

### 3 结论

梯度功能陶瓷刀具由于其热物理性能的合理梯度变化, 在切削过程中刀具内的热应力得到了缓解。切削速度越高, 切削过程中产生的热量越多, 热应力缓解的程度也越大。随切削速度的提高, 梯度功能陶瓷刀具 FG-2 内的热应力增大的幅度与普通陶瓷刀具 SG-4 内的热应力增大的幅度相比明显减小, 由于随切削速度的提高, 热应力在刀具的损坏中所占的比重逐渐增大, 所以梯度功能陶瓷刀具比普通陶瓷刀具更适应于高速切削。

#### 参考文献

- 1 艾兴, 萧虹. 陶瓷刀具切削加工. 北京: 机械工业出版社, 1988
- 2 Ai Xing, Zhao Jun, Zhang Jianhua, et al. Development of an advanced ceramic tool materials-functionally gradient materials. Mater. Sci. Eng. A, 1998, 248(1~2): 125~131
- 3 赵军, 艾兴, 张建华, 等. 梯度功能陶瓷刀具材料的残

- 余应力设计及制备. 硅酸盐学报, 1998, 26(3): 292~299
- 4 赵军, 艾兴, 张建华, 等.  $Al_2O_3/TiC$  系梯度功能陶瓷刀具材料的设计. 机械工程学报, 1998, 34(4): 69~73
- 5 赵军. 梯度功能陶瓷刀具材料的设计制造及其切削性能研究: [博士学位论文]. 济南: 山东工业大学, 1998

### THERMAL STRESSES ANALYSIS OF FUNCTIONALLY GRADED CERAMIC TOOL

Wang Yongguo

(Shanghai Jiaotong University)

Ai Xing Li Zhaoqian Deng Jianxin Zhao Jun

(Shandong University)

**Abstract:** The thermal stresses in functionally graded ceramic tool are calculated using finite element methods. Results show that there is little difference between the thermal stresses in the functionally graded ceramic tool and in the common ceramic tool in lower cutting speed. While the thermal stresses in the functionally graded ceramic tool are much smaller than in the common ceramic tool in high cutting speed conditions. This phenomenon show that functionally graded ceramic tool is more suitable for high-speed cutting.

**Key words:** Functionally graded Ceramic tool  
Thermal stresses

作者简介: 王永国, 男, 1969年出生, 博士后。主要从事梯度功能陶瓷刀具、金属/陶瓷覆层材料的研究工作, 发表论文近20篇。