

# 刀具钝化半径的求解模型

孔维平,张永强,文立东,赵巍,宋安邦

成都工具研究所有限公司

**摘要:** 刀具钝化半径的大小直接影响刀具使用寿命。本文针对刀具钝化情况建立了摩擦力模型、碰撞断裂磨损模型和钝化半径求解模型。经分析得到:钝化半径与刀具材料和结构特征、混合料、钝化时间和钝化运动情况有关;刀具刃长越短,前刀面与后刀面的夹角越小,钝化混合料的速度越大,达到目标钝化半径所需的时间就越少;通过钝化半径求解模型还可以预测刀具钝化半径大小。

**关键词:** 钝化半径;摩擦力;碰撞;硬质合金刀具

中图分类号: TG71;TH161

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2019.04.018

## Model for Calculating Tool Passivation Radius

Kong Weiping, Zhang Yongqiang, Wen Lidong, Zhao Wei, Song Anbang

**Abstract:** The size of the tool passivation radius directly affects the tool service life. In view of the tool passivation, friction model, collision fracture wear model and passivation radius solution model are established. The results show that the passivation radius is related to the characteristics of tool material and structure, mixture, passivation time and passivation motion. The shorter the cutter blade is the angle between the front cutter face and the back cutter face is smaller, the speed of the passivation mixture is greater, and the time to reach the target radius is shorter. The model can also predict the size of the tool passivation radius by using the passivation radius model.

**Keywords:** passivation radius; friction; force; impact carbide tool

## 1 引言

刀具寿命是评价硬质合金刀具性能是否优良的一项重要因素,刀具刃口的形貌特征是影响刀具寿命的最直接因素。对于新加工的硬质合金刀具,其切削刃存在微小崩刃或锯口,这些微观缺口极易扩展,加速刀具磨损,从而降低刀具寿命<sup>[1]</sup>。此外,刃口处还存在应力、粗糙度不均匀和热应力裂纹等缺陷。刀具钝化可以使刃口平整度良好,消除刃口残余应力和热应力裂纹,减少刀具在使用过程中的积屑瘤堆积,从而提高刀具寿命。

长期以来,关于刀具的钝化半径大多由经验方法获得,当钝化方式、混合料、以及刀具情况等发生改变时,经验方法很难判断钝化半径的大小<sup>[2]</sup>。本文对钝化过程中刀具和混合料颗粒进行研究,通过分析钝化过程中的摩擦力和能量损失,得到了刀具钝化过程中的力学模型。

## 2 摩擦力模型分析

刀具在刚玉混合料中的钝化,实际上是刀具的前刀面和后刀面在混合料颗粒的摩擦力下沿着刃口

微观裂纹脱落的过程<sup>[3]</sup>。刀具刃口钝化如图1所示。混合料虽然类似流体,但相对刀具特征尺寸而言,颗粒的大小和形状并不能忽略,因此不能简单地通过流体力学来计算钝化过程中的摩擦力。

刀具前刀面和后刀面的摩擦力矢量和即为刀具所受到的摩擦力。假设在刀具钝化过程中,混合料颗粒都是刚体,其颗粒间的碰撞没有能量损失。则刀具在钝化过程中的能量损失全为摩擦力做功。

因混合料颗粒为刚体,且刀具浸没在混合料中,可以认为在钝化过程中始终有颗粒与刀具前后刀面接触,即钝化过程中只有摩擦力对刀具前后刀面做功。摩擦面的正压力由混合料来流速度方向决定,并对混合料颗粒产生一个附加加速度。在刀具旋转型的钝化方式中,附加加速度等于向心加速度,在磨料喷射型钝化方式中,附加加速度等于重力加速度。

设磨料来流速度为 $v$ ,所确定的附加加速度在速度方向上的力为 $F_N$ ,磨料来流速度与摩擦面之间的夹角为 $\alpha$ ,摩擦系数为 $\mu$ ,则刀具摩擦面某一时刻所受的摩擦力为

$$f = \mu F_N \sin \alpha \quad (1)$$

对于旋转型钝化,设刀具质量为 $M$ ,旋转半径为 $R$ ,旋转速度为 $v_M$ ,则

$$F_N = M \frac{v_M^2}{R} \quad (2)$$

对于磨料喷射方式的钝化,设混合料颗粒的质量为  $m$ ,在刀具摩擦面上的流量为  $Q$ ,则有

$$F_N = Qmg \quad (3)$$

对于刀具前刀面和后刀面上的摩擦力  $f_1$  和  $f_2$ ,有

$$\begin{cases} f_1 = \mu F_N \sin \alpha_1 \\ f_2 = \mu F_N \sin \alpha_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别为磨料来流速度与前刀面和后刀面之间的夹角。

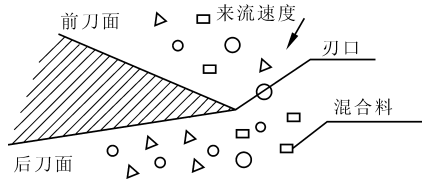


图1 刀具刃口钝化

### 3 建立断裂磨损模型

新加工的刀具切削刃上存在大量的微观裂纹。刀具钝化时,当磨料压入和划擦材料表面时,压痕处的材料产生变形,磨料压入深度达到临界深度时,随压力而产生的拉伸应力足以使裂纹产生<sup>[4]</sup>。裂纹主要有两种形式:垂直于表面的中间裂纹和从压痕底部向表面扩展的横向裂纹。在这种压入条件下,横向裂纹相交或扩展到表面时,材料微粒便产生脱落,形成磨屑。由于裂纹能超过擦痕的边界,所以断裂引起的材料迁移率可能比塑性变形引起的材料迁移率大得多。试验证明,对于脆性材料,如果磨料棱角尖锐、尺寸大,且施加载荷高时,以断裂过程产生的磨损为主,故磨损率很高<sup>[5]</sup>。

假设刀具刃口处的材料脱落是刀具在摩擦力合力的作用下,刀具材料沿微观裂纹的分离,则该分离过程可假设为混合料颗粒与刀具刃口的碰撞,会导致刀具在微观裂纹处分离成两部分,一部分是刀具整体,另一部分是刀具上脱落下来的小颗粒。

理想的刀具碰撞模型:①假设在每一次碰撞过程中,脱落的刀具颗粒的质量体积相等,即脱落下来的颗粒能量相同,设为  $E_0$ ,在碰撞过程中,只有能量达到  $E_0$  时才会发生颗粒脱落;②假设刀具颗粒的脱落是有先后顺序的,即当一个颗粒脱落后才会有第二个颗粒脱落,大颗粒的脱落都认为是小颗粒依次脱落的结果;③假设刀具的脱落是沿着刀具特征长度方向从远到近依次沿着合力方向脱落,即在刃口刃尖处最先脱落,然后沿着刀具半径方向向中心扩展。

假设碰撞过程都是完全碰撞,没有能量损失,且

碰撞都是有效碰撞,因此碰撞过程符合能量守恒定律和动量守恒定律。如图2所示,假设刀具脱落下来质量为  $m_1$  的颗粒能量为  $E_0$ ,刀具总质量为  $M$ ,钝化后刀具质量为  $M_1$ ,混合料颗粒质量为  $m$ 。碰撞前混合料颗粒的速度为  $v_0$ ,刀具的速度为  $0$ ,碰撞后混合料颗粒的速度为  $v_2$ ,刀具脱落颗粒的速度为  $v_1$ ,则根据能量守恒定律和动量守恒定律有

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}mv_0^2 &= \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}mv_2^2 \\ mv_0 &= m_1v_1 + mv_2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$M = M_1 + \sum m_1$$

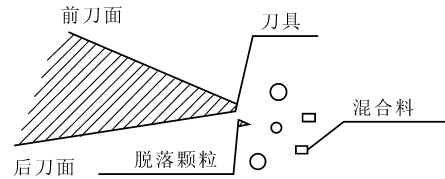


图2 刃口断裂磨损

### 4 建立钝化半径求解模型

大量的钝化试验表明<sup>[6]</sup>,刀具在钝化时刃口处材料的磨损不仅与刀具旋转速度有关,还与刀具旋转方向相关,转速越快,刀具刃口材料磨损越快。旋转方向和刀具切向一致时,刀具前刀面更容易钝化成瀑布型刃口,钝化后前刀面的粗糙度大大提升;旋转方向相反时,后刀面更容易钝化成瀑布型刃口,钝化后的后刀面粗糙度得到大大改善。

假设刀具钝化时,刃口处的磨损是沿着一定特征方向的,该特征方向沿着垂直于刀具所受摩擦力的合力方向,且指向刀具中心一侧。而在单一的摩擦面上,在该面的摩擦力作用下,材料的磨损沿着特征方向的材料去除,所以刀具的钝化是刃口在前刀面和后刀面上的摩擦力共同作用下发生的材料磨损。

由于在钝化过程中,混合料颗粒和刀具材料未发生变化,只是前后刀面的粗糙度发生了变化,假设摩擦力在钝化过程中为恒定值,则摩擦力在某一面上的功率  $P$  为

$$P = fvcos\alpha \quad (6)$$

混合料颗粒对刀具摩擦面在时间  $t$  内所做的功为

$$W = Pt \quad (7)$$

因摩擦去除的刀具质量  $M_0$  为

$$M_0 = \frac{W}{E_0}m_1 \quad (8)$$

由于刀具微小颗粒的脱落是刀具和混合料颗粒之间的碰撞造成,其碰撞过程中的力场只有重力场,

因此  $E_0 = m_1 g$ ,  $g$  为重力加速度。即有

$$M_0 = \frac{W}{g} = \frac{f t \cos \alpha}{g} \quad (9)$$

因此,在  $t$  时间内刀具的钝化半径是总质量为  $M_0$  的许多个小颗粒在摩擦力下的脱落。因为刀具前刀面和后刀面受力不均匀,所以钝化后刃口部分应为曲线弧形。为了方便计算,假设钝化后的刃口为一标准圆弧。设  $t$  时间内获得的钝化半径为  $r$ ,  $l$  为特征长度。如图3所示,为了方便计算,假设  $l$  在一确定的三角形内,此三角形为三棱柱的近似截面,三棱柱的体积为刃口部分钝化去掉的材料体积。该三角形的顶角为前刀面与后刀面之间的夹角  $\theta$ , 两边为摩擦力  $f_1$  和  $f_2$ , 前刀面与后刀面确定的长度  $l_1$  和  $l_2$ ,  $l$  与  $l_1$  和  $l_2$  之间的夹角分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ 。

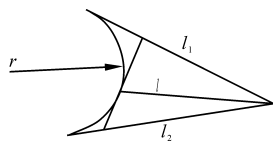


图3 钝化半径三棱柱截面

设刀具刃长为  $p$ , 刀具硬质合金密度为  $\rho$ , 则根据几何关系有

$$\begin{cases} V = \frac{1}{2} l_1 l_2 \rho \sin \theta = \frac{M_0}{\rho} \\ \frac{l_1}{l_2} = \frac{f_1}{f_2} = \frac{\theta_1}{\theta_2} \\ \frac{1}{2} l_1 l_2 \sin \theta = \frac{1}{2} l l_1 \sin \theta_1 + \frac{1}{2} l l_2 \sin \theta_2 \\ \theta = \theta_1 + \theta_2 \end{cases} \quad (10)$$

联立上式,可求解得到特征长度  $l$  为

$$l = \sqrt{\frac{2 f_2 M_0 \sin \theta}{\rho p f_1 \left( \frac{f_2}{f_1} \sin \theta_2 + \sin \theta_1 \right)}} \quad (11)$$

设钝化后刀具材料去除的截面面积为  $D$ ,  $D$  是一个曲边梯形,可表示为

$$\begin{aligned} D &= \int_s ds = \frac{1}{2} (l+r) r \cos \theta_1 + \frac{1}{2} (l+r) r \cos \theta_2 - \frac{90-\theta}{360} \pi r^2 \\ V &= D p = \frac{M_0}{\rho} \end{aligned} \quad (12)$$

结合上式,可得到钝化半径  $r$  的求解公式为

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{\frac{360 f t \cos \alpha}{\rho p g} + \left[ \frac{90 l}{180 (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) - (90 - \theta) \pi} \right]^2} \\ &\quad - \frac{90 l}{180 (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) - (90 - \theta) \pi} \end{aligned} \quad (13)$$

由于实际钝化过程中不可避免地会出现能量损失,颗粒的碰撞并不完全是有效碰撞,因而  $M_0$  小于理论值,从  $r$  的求解公式中可知  $r$  与  $\sqrt{M_0}$  成正比。所以可对  $r$  的求解公式做修正,令修正因子为  $k$ ,即

有  $r_k = k r$ ,  $k$  的范围为  $0 < k < 1$ 。

根据  $r$  的求解半径公式可知,刀具的钝化半径不仅与刀具本身材料、混合料、钝化时间有关,还与刀具结构特征、钝化运动情况有关。刀具刃长越短,前刀面与后刀面的夹角越小,钝化混合料的速度越大,达到目标钝化半径的时间就越小。

## 5 结语

(1) 针对刀具在混合料中的钝化,通过求解刀具前刀面和后刀面的摩擦力可以清楚地获得刀具刃口在钝化时的受力情况,从而可选择适当的钝化方式、混合料来流速度以及来流速度与刀具摩擦面的角度,以获得想要的钝化刃口受力状态。

(2) 考虑到新加工的刀具刃口附近存在大量的微观裂纹,建立了混合料颗粒与刀具的碰撞理论,并在此基础上建立了钝化半径的求解模型,从而可以通过设定钝化条件预测钝化半径。

(3) 根据钝化半径求解模型,刀具的钝化半径与刀具本身材料、刀具结构特征、混合料、钝化时间和钝化运动情况有关。刀具刃长越短,前刀面与后刀面的夹角越小,钝化混合料的速度越大,达到目标钝化半径所需的时间就越短。

## 参考文献

- [1] 李伯民,赵波. 现代磨削技术[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
  - [2] 郑维娟. 立铣刀刃口钝化工艺及其切削性能研究[D]. 贵阳:贵州大学,2015.
  - [3] 李飞,江铁强,姚斌,等. 硬质合金可转位刀具刃口切削综合仿真研究[J]. 工具技术,2013,47(2):13-19.
  - [4] 廖志远,余建武,曾辉藩. 硬质合金刀具材料磨削崩裂原因分析[J]. 机械工程师,2015(9):188-189.
  - [5] 罗文宣,薛俊峰,薄海青,等. 整体硬质合金刀具磨削裂纹的原因分析及其工艺改进[J]. 工具技术,2006,40(6):37-40.
  - [6] 罗刚,刘文泽,胡剑华,等. 硬质合金型线铣刀刃口钝化研究[J]. 东方汽轮机,2017(1):42-48.
- 第一作者:孔维平,工程师,成都工具研究所有限公司,610500 成都市  
First Author: Kong Weiping, Engineer, Chengdu Tool Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610500, China