

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.09.013

# 工程陶瓷车削刀具磨损机理及理论模型的研究

马廉洁<sup>1,2</sup>, 王馨<sup>1</sup>, 陈景强<sup>1</sup>, 周云光<sup>1</sup>

(1. 东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 通过二硅酸锂玻璃陶瓷的切削实验, 依据摩擦学原理, 结合犁沟效应从微观层面讨论了陶瓷材料对切削刀具磨损机理的影响. 通过引入陶瓷晶体相关参数, 揭示了陶瓷晶体的形貌和排布方式在车削过程中对刀具磨损量的影响, 使磨损机理应用更具广泛性和直观性. 结合几何学和运动学分析, 建立了工程陶瓷材料车削刀具体积磨损量模型, 并进行了实验验证. 理论和实验结果均表明随切削路程的增大, 刀具体积磨损量先表现为稳定增加, 随后由于磨损面的不断增加以及热量堆积导致黏结磨损现象的出现, 刀具磨损速度急剧加快, 最终导致刀具刃缘崩碎而失效.

**关键词:** 体积磨损量; 晶体; 刀具磨损; 车削; 工程陶瓷

中图分类号: TG 712; TH 117.1 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2020)09-1291-06

## Study on Mechanism and Theoretical Model of Tool Wear in Engineering Ceramics Turning

MA Lian-jie<sup>1,2</sup>, WANG Xin<sup>1</sup>, CHEN Jing-qiang<sup>1</sup>, ZHOU Yun-guang<sup>1</sup>

(1. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China; 2. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: MA Lian-jie, E-mail: mlj@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** Based on the tribological principle and furrow effect, the effect of ceramic material on the wear mechanism of cutting tools was discussed by cutting experiment of lithium disilicate glass ceramics. By introducing the related parameters of ceramic crystal, the influence of the morphology and arrangement for ceramic crystal on the tool wear in the turning process was revealed, which made the application of wear mechanism more extensive and intuitive. Based on geometric and kinematic analysis, a model of the tool wear of turning tools for engineering ceramics was established and tested. Both the theoretical and experimental results show that, with the increase of cutting length, the wear volume first shows a steady increase, and then due to the increasing wear surface and the heat accumulation causes the phenomenon of bond wear, the tool wear speed increases sharply, and finally leads to the tool edge breakage and failure.

**Key words:** wear volume; crystals; tool wear; turning; engineering ceramics

工程陶瓷因其优异的性能而广泛应用于工业零件<sup>[1-2]</sup>. 例如, 工程陶瓷可应用于轴承、涡轮叶片、热机部件<sup>[3-4]</sup>和刀具<sup>[5-6]</sup>. 然而, 陶瓷的生产因其低韧性和高硬度而存在困难, 加工损伤大且成本较高, 从而使其应用潜质受到了很大限制. 基于此, 研究人员通过微观结构设计、制备条件控制等方法来改善陶瓷材料的可加工性<sup>[7]</sup>, 作为脆性材料, 其切削行为仍表现为微观裂纹扩展方式, 而

与塑性材料不同的是其切屑为粉末状<sup>[8]</sup>, 在易造成加工环境和加工设备污染的同时也易造成严重的刀具磨损. 对于任何加工系统, 加工过程中最重要的信息之一是刀具失效, 因此在脆性材料的现代机加工制造过程中, 预测、监测、控制刀具磨损, 建立刀具磨损理论模型对于提高产品加工质量和提高生产效率具有极为重要的现实意义.

二硅酸锂玻璃陶瓷优良的生物相容性、耐腐

蚀性和耐磨损性被广泛应用于机械工程和工业加工等领域,二硅酸锂玻璃陶瓷材料车削加工过程中刀具磨损的机理建模研究对提高工程陶瓷加工效率、降低加工成本是有重要的现实意义。

本文基于摩擦学、几何学及运动学,提出脆性材料切削过程中刀具磨损的磨损机理,建立脆性材料车削刀具磨损理论模型,通过 YG6 刀具车削二硅酸锂玻璃陶瓷实验对模型加以精度验证。

## 1 脆性材料车削刀具犁沟效应磨损机理

Ma 等<sup>[9]</sup>认为在工程陶瓷切削过程中的微裂纹扩展最终导致材料去除,由于晶体相的随机、多向分布容易造成晶体间互锁,如图 1a 中表现为微裂纹局部随机扩展,宏观裂纹大、小规模交替扩展。因此,陶瓷已加工表面普遍存在加工损伤,形成凹坑和凸起硬峰,如图 1b 所示,这种尖锐粗糙峰在与刀具错位挤压的过程中难以被去除,而是嵌入相对其较软的刀具磨损表面并造成微观反切削,对刀具形成直接磨损,此即犁沟效应。

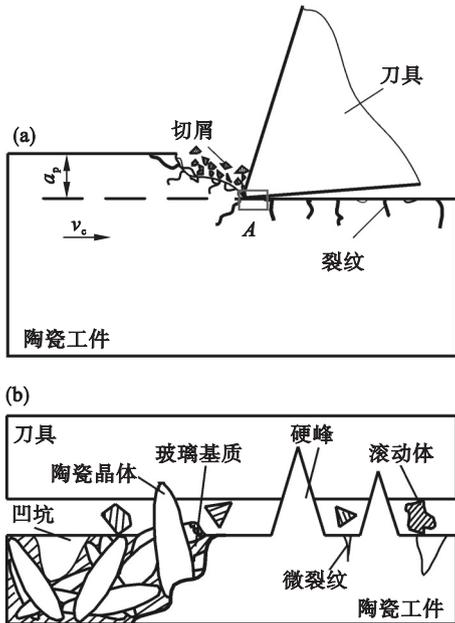


图 1 脆性材料车削刀具磨损的犁沟效应机理

Fig. 1 Furrow effect mechanism of turning tool wear in brittle materials

(a) — 脆性材料切削原理示意图;

(b) — 图 1a 中 A 区域刀具工件接触状态。

在 YG6 刀具车削二硅酸锂玻璃陶瓷过程中,对车削产生的陶瓷切屑在金相显微镜下观察,如图 2 所示,可见切屑是由形态均匀的微小短棒状或球状的二硅酸锂玻璃陶瓷晶体集聚而成,其尺

寸大多介于  $2 \sim 4 \mu\text{m}$ ,为方便计算,下文中将晶体形态简化为半径固定的球体。

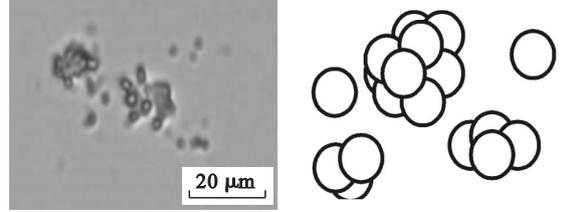


图 2 金相显微镜下实际玻璃陶瓷切屑及其形态示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of actual glass ceramic chips and their morphology under metallographic microscope

## 2 脆性材料车削刀具体积磨损量理论模型

### 2.1 刀具体积磨损量

以后刀面磨损宽度 VB 为刀具磨钝标准的不足之处在于其仅对刀具磨损进行了局部的二维描述。在实际加工过程中,存在如刃缘压溃而产生的刀具失效,此时后刀面磨损宽度还未达到磨钝标准,因而产生误判造成经济损失。为弥补该缺陷,本文将二维过渡到三维,将局部上升至近全局,引入刀具体积磨损量  $V_v$ 。刀具体积磨损量能够从材料强度出发反映刀具的磨损过程,更好地揭示刀具磨损材料迁移的本质,科学地考察刀具强度与磨损的关系,简洁直观,易于测量。

### 2.2 刀尖磨损面积

脆性材料干车削中,由于库伦摩擦等原因会产生刀尖磨损,导致刀尖圆弧变直,不断形成的新切削刃向刀体移动,主后刀面与副后刀面的交线长度  $h$  变短(如图 3 所示),使得刀尖与工件进行面接触。Ma<sup>[10]</sup>认为由于刀尖圆弧及主后刀面与副后刀面相交处圆弧的存在,当刀尖产生垂直磨损时(刀具前角为零),其磨损面可近似为半椭圆面,设该半椭圆长半轴长为  $n$ ,短半轴长为  $m$ ,根据几何关系得

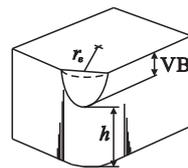


图 3 刀尖磨损模型

Fig. 3 Pattern mode of tool wear

$$m = \sqrt{r_0^2 - (r_0 - h_r)^2}, \quad (1)$$

$$n = VB. \quad (2)$$

式中:  $h_r$  为刀尖磨损深度; VB 为刀具后刀面磨损

宽度;  $r_e$  为刀尖圆弧半径。

刀尖磨损面积  $A_w$  为

$$A_w = \frac{1}{2} \pi mn = \frac{1}{2} \pi VB \sqrt{r_e^2 - (r_e - h_r)^2}. \quad (3)$$

由图4可看出,  $VB$  与  $h_r$  存在如下关系:

$$h_r = VB \tan \alpha_0. \quad (4)$$

式中  $\alpha_0$  为刀具后角。

故刀尖磨损面积  $A_w$  为

$$A_w = \frac{\pi h_r}{2 \tan \alpha_0} \sqrt{2r_e h_r - h_r^2}. \quad (5)$$

当  $h_r \ll r_e$  时,  $A_w$  为

$$A_w = \frac{\pi}{2 \tan \alpha_0} \sqrt{2r_e} h_r^{\frac{3}{2}}. \quad (6)$$

### 2.3 刀尖体积磨损量

Ma<sup>[10]</sup>指出由于刀尖圆弧半径  $r$  的存在, 且主后刀面与副后刀面相交圆弧半径会逐渐缩小, 刀尖磨损体可近似看成图4中圆锥被垂直于底面且不过圆锥顶点的平面所切下来的体积较小的那一部分三维体。

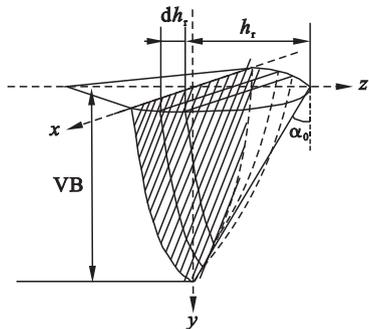


图4 刀具磨损计算模型

Fig. 4 Calculation model of tool wear

初期磨损阶段, 新刀片在参与车削时, 其锋利的刀刃抗冲击、抗剪力能力较差, 刀具磨损并不以犁沟效应为主, 而是在剧烈的冲击及高频率的交变应力作用下表现为块状剥落、磨损速率快、持续时间短, 此种现象在加工脆性材料时表现得尤为明显。在稳定磨损阶段, 刀具后刀面磨损机理主要为犁沟效应, 即库伦摩擦<sup>[11]</sup>。当刀尖与工件挤压时, 其剪切力主要来源于磨损面与工件表面之间的摩擦力和主切削力。设刀具初期磨损阶段的磨损深度为  $h_{r0}$ , 则此磨损体体积为

$$V_V = \begin{cases} V_{V0} = \int_0^{h_{r0}} A_w dh_r, & (0 \leq h_r \leq h_{r0}); \\ V_{V1} = \int_{h_{r0}}^{h_{r, \max}} A_w dh_r, & (h_{r0} < h_r \leq h_{r, \max}). \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $V_V$  为刀尖磨损体积;  $V_{V0}$  为初期磨损阶段磨

损体积;  $V_{V1}$  为稳定磨损阶段磨损体积;  $h_{r, \max}$  为刀尖最大磨损深度。

故刀尖总体积磨损量为

$$V_V = V_{V0} + V_{V1}. \quad (8)$$

初期磨损阶段, 由于刀具前角为零, 因此该磨损的主要作用力来源于主切削力, 当磨损面较小, 且造成的剪应力达到或超过刀尖的屈服极限时, 刀尖发生块状剥落, 根据强度理论,

$$\sigma_s = \frac{F_c}{A_w} = \frac{2 \tan \alpha_0 F_c}{\pi \sqrt{2r_e} h_{r0}^{\frac{3}{2}}}, \quad (9)$$

可求得初期磨损阶段磨损深度为

$$h_{r0} = \left( \frac{2 \tan \alpha_0 F_c}{\pi \sigma_s \sqrt{2r_e}} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (10)$$

式中:  $F_c$  为主切削力;  $\sigma_s$  为刀具屈服极限。

为了方便探究刀具磨损体积随时间的变化规律, 现将刀具磨损体积与时间的函数关系先转换为磨损深度关于时间的函数:  $V_V(t) \Rightarrow h_r(t)$ 。

图5为玻璃陶瓷反切削示意图。由图可知, 在切削时脱落的陶瓷晶体及切屑合参与到反切削过程中, 考虑到三体磨损, 引入参数  $K_a$ , 从轮廓曲线平面与沟壑所占比例计算得  $K_a = 0.9$ 。

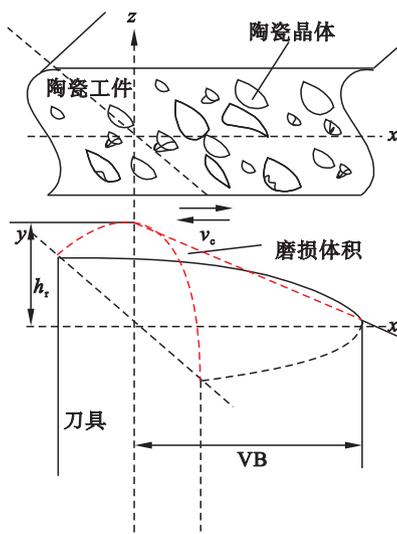


图5 玻璃陶瓷反切削示意图

Fig. 5 Schematic diagram of glass ceramics anti-cutting

由几何关系可表达出时间与刀尖磨损面积关系式:

$$t = \frac{A_w}{n_j K_a d v_c}. \quad (11)$$

式中:  $n_j$  为实际作用于刀具磨损表面上的硬峰数量;  $K_a$  为磨料磨损常数;  $d$  为晶体直径;  $v_c$  为切削速度。

$$n_j = \frac{v_c t m}{\pi \left( \frac{d}{2} \right)^2} K_j. \quad (12)$$

式中,  $K_j$  为磨损面影响因素, 考虑到有效硬峰作用在半椭圆面上, 作用长度不能全部达到  $VB$ , 由几何关系计算得 0.67.

为了方便计算, 将实际作用硬峰(即陶瓷晶体)简化为半球体, 当刀具磨损厚度为  $dh_r$  时, 随着刀具的运动轨迹, 被加工材料上的有效硬峰的实际作用面积为一规则长方形, 长为  $v_c t$ , 宽为  $m$ , 如图 6 所示.

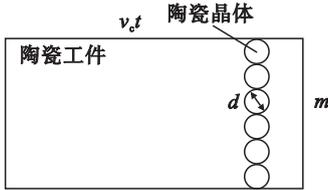


图 6 反切削过程中有效晶体示意图

Fig. 6 Schematic diagram of effective crystal in anti-cutting progress

单个硬峰在刀具上作用面积为

$$A_{\Delta} = \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2, \quad (13)$$

则

$$t = \frac{1}{2v_c} \sqrt{\frac{\pi d A_w}{m K_a}}. \quad (14)$$

结合式(13), 式(14), 可得

$$t = \frac{\pi}{2v_c} \sqrt{\frac{dh_r}{2K_a \tan \alpha_0}}. \quad (15)$$

整理积分可得

$$h_r = \frac{8(t^2 + C)v_c^2 K_a \tan \alpha_0}{\pi^2 d}, \quad (16)$$

$$V_{V1} = \int_{h_{r0}}^{h_{rmax}} A_w dh_r = \frac{\pi \sqrt{2r_s}}{5 \tan \alpha_0} \times \left\{ \left[ \frac{8(t^2 + 0.35)v_c^2 K_a \tan \alpha_0}{K_s K_{\phi} \pi^2 d} \right]^{\frac{5}{2}} - \left[ \frac{2 \tan \alpha_0 F_c}{\pi \sigma_s \sqrt{2r_s}} \right]^{\frac{5}{3}} \right\}. \quad (17)$$

式中:  $K_s$  为结晶率, 由二硅酸锂玻璃陶瓷属性可知其结晶率约为 0.7<sup>[12]</sup>;  $K_{\phi}$  为晶体影响系数, 即在反切削过程中晶体由于并非理想半球形, 作用宽度小于晶体平均直径  $d$ , 在多次实验验证中可计算得 0.7.

### 3 脆性材料车削刀具体积磨损量模型验证

#### 3.1 实验

外圆车削实验于 CAK5085 型数控车床上进行, 工件为两种晶粒度的二硅酸锂玻璃陶瓷棒料.

选用 YG6 硬质合金车刀, 刀具主偏角  $\kappa_r$  为 45°, 副偏角  $\kappa'_r$  为 45°, 刃倾角  $\lambda_s$  为 0°, 刀尖圆弧半径  $r_s$  为 0.5 mm, 屈服极限  $\sigma_s$  为 1 800 MPa. 以切削路程为变量进行单因素实验. 实验中切削速度  $v_c$  为 600 r/min, 进给量  $v_f$  为 0.03 mm/r, 切削深度  $a_p$  为 0.02 mm. 实验前后刀具体积磨损量变化用 DSX110 型 3D 激光共聚焦显微镜测量. 为减小数据不确定性, 刀具体积磨损量实验值为同批刀具和材料重复 5 次相同实验后实际测量数值的平均值.

车削实验后保留切屑, 取样品 1 和样品 2 在体积分数为 2% 的氢氟酸溶液中腐蚀 50 s 后使用金相显微镜观察其微观形貌. 经过 2% 的氢氟酸腐蚀后,  $Li_2Si_2O_5$  晶粒和其聚集体完整保留, 在金相显微镜下可随机选取 5 个清晰成像且独立的晶粒测量其直径(如图 7 所示), 样品 1 和样品 2 的晶粒直径的平均值  $d_1, d_2$  分别为 3.01  $\mu\text{m}$  和 4.03  $\mu\text{m}$ , 具体实验测量数值如表 1 所示.

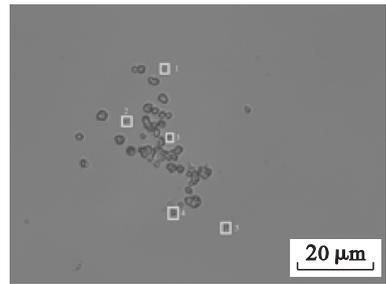


图 7 陶瓷晶粒度测量

Fig. 7 Ceramic grain size measurement

表 1 陶瓷晶粒直径测量值

Table 1 The measurement data of ceramic grain diameter						
样品 1	1	2	3	4	5	均值 $d_1$ $\mu\text{m}$
晶粒直径 $d_1/\mu\text{m}$	2.945	3.274	3.022	3.019	2.767	3.01
样品 2	1	2	3	4	5	均值 $d_2$ $\mu\text{m}$
晶粒直径 $d_2/\mu\text{m}$	4.024	4.163	3.985	3.899	4.102	4.03

#### 3.2 脆性材料车削刀具体积磨损量理论模型验证

将摩擦系数、刀具参数、切削路程、车削深度等参数代入式(8), 所得体积磨损量理论值和实验值如表 2 所示.

图 8 所示为 YG6 刀具体积磨损量理论值与实验值在不同陶瓷晶粒度下随切削路程的变化关系. 从图中可知理论值与实验值趋势吻合良好. 以样品 1 为例, 当切削路程在 80 ~ 560 mm 时, 刀具体积磨损量呈上升趋势. 此状况是因为在车削过

程中,刀尖所受交变应力频率相对较小,故磨损量较小且磨损速度较稳定;在 560 mm 之后继续增大切削路程,由于刀具磨损面的逐步扩大,刀具体

积磨损量随路程增加而快速增加,出现少量黏结磨损特征且车床振动开始加剧,若持续增加刀具车削路程则刀具刃缘崩碎明显,导致刀具失效。

表 2 YG6 刀具车削二硅酸锂玻璃陶瓷刀具体积磨损量实验结果

Table 2 Experimental results of wear volume of YG6 tool turning on lithium disilicate glass ceramic tool

序号	切削路程 $l/\text{mm}$	磨损量实验值 1	磨损量理论值 1	磨损量实验值 2	磨损量理论值 2
		$V_{V11}/\mu\text{m}^3$	$V_{V12}/\mu\text{m}^3$	$V_{V21}/\mu\text{m}^3$	$V_{V22}/\mu\text{m}^3$
1	80	1.33E+07	1.44E+07	1.39E+07	1.9E+07
2	160	1.70E+07	1.67E+07	1.78E+07	2.21E+07
3	240	1.98E+07	2.07E+07	2.67E+07	2.73E+07
4	320	3.31E+07	2.79E+07	4.06E+07	3.71E+07
5	400	4.52E+07	3.87E+07	5.99E+07	5.03E+07
6	480	7.60E+07	5.49E+07	6.73E+07	7.28E+07
7	560	8.40E+07	7.85E+07	8.99E+07	1.02E+08
8	640	8.98E+07	1.12E+08	1.05E+08	1.49E+08
9	720	1.12E+08	1.60E+08	1.64E+08	2.07E+08

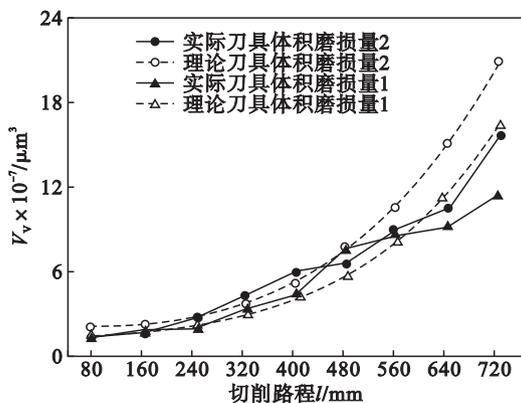


图 8 刀具体积磨损量与切削路程关系曲线

Fig. 8 The relationship between wear volume of tool and cutting length

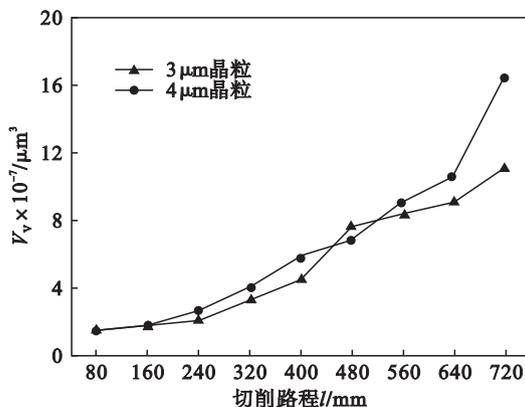


图 9 不同晶粒度对刀具体积磨损量的影响

Fig. 9 Effects of different grains size on wear volume of tool

### 3.3 晶粒度对刀具体积磨损量的影响

图 9 比较了在不同晶粒度下刀具体积磨损量随切削路程的变化关系. 由图可知同样切削路程内晶粒度越大的陶瓷材料对 YG6 刀具的反切削效果越明显,刀具体积磨损量也越大. 4  $\mu\text{m}$  直径尺寸晶粒的陶瓷材料在车削 400 mm 之后刀具体积磨损速度出现放缓,而 3  $\mu\text{m}$  直径尺寸晶粒的陶瓷材料在车削 600 mm 时才出现此现象,这是由于大直径晶粒拥有更大的犁沟角和犁沟深度,在反切削刀具的过程中不仅加快了刀具体积的磨损,还使刀尖堆积了更多的热量导致黏结磨损。

由实验拍摄刀尖磨损形态可知,刀具磨损前期如图 10a 所示,虽然由于刀尖受到撞击产生微破碎而导致刀尖磨损面并不规则,但是磨损面表面依然呈现犁沟形貌, YG6 刀具在陶瓷晶粒作用下基本符合模型预计的磨损规律,因此而前期刀具体积磨损量理论值与实验值拟合度较高。

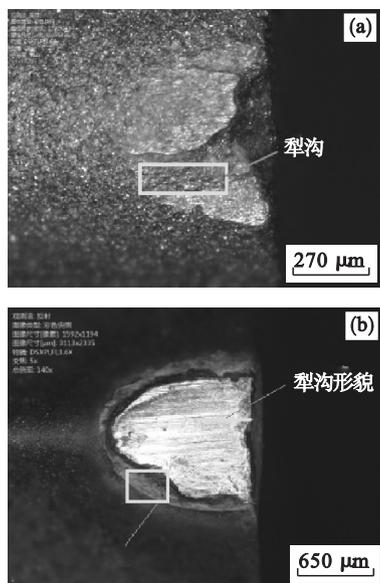


图 10 不同切削路程下刀尖磨损形貌

Fig. 10 Wear morphology of tool tips in different cutting distances

(a)— $l=240\text{ mm}$ ; (b)— $l=640\text{ mm}$ .

图10b展示了实验后期刀尖磨损形态,刀尖磨损面较前期更加规则,基本完全呈现犁沟形貌.观察磨损面周围有白色颗粒黏附可知出现了黏结磨损.这是由于陶瓷导热性能差,在车削一段路程后刀尖会产生并堆积大量热量,在车削陶瓷材料时,陶瓷基质萌生裂纹产生破碎,而高硬度的陶瓷晶粒不仅在高温高压作用下对刀具进行了反切削,同时还使刀尖振动加剧,切削和空切交替进行,造成热应力疲劳,促使了黏结效应的发生,所以刀具体积磨损量在后期增量放缓.

## 4 结 论

1) 从微观层面描述了工程陶瓷车削过程中刀-件耦合刀具磨损机理,通过引入陶瓷晶体相关参数对刀具磨损量进行建模预测,增强了材料属性对刀具磨损量影响的表述以及模型的准确性.

2) 工程陶瓷车削过程中刀具的主要磨损机理为犁沟效应.陶瓷材料中晶粒的形态结构和分布方式直接决定了犁沟的形成和几何参数.车削过程中产生的切屑为陶瓷晶体团聚物,切屑的产生及破碎使刀具磨损过程由二体磨损转换为三体磨损.

3) 工程陶瓷车削中的刀具体积磨损量随切削路程的增加而加速增长,当继续增加车削路程后,由于陶瓷散热率低,热量集聚出现黏结磨损现象;同时磨损面过大,刀具体积磨损量较前期急剧增加,当车削路程过长,车床振动加剧,刃缘崩碎明显,最终导致刀具失效.

### 参考文献:

[1] Sreejith P S. Machining force studies on ductile machining of silicon nitride [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 169(3): 414-417.

[2] 尹国强, 巩亚东, 李雨晴, 等. 新型点磨削砂轮磨削表面/亚表面质量研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(6): 835-840.

(Yin Guo-qiang, Gong Ya-dong, Li Yu-qing, et al. Study on the grinding surface and subsurface quality of novel point grinding wheels [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2019, 40(6): 835-840.)

[3] Delgado Y P, Bonny K, Baets P D, et al. Impact of wire-EDM on dry sliding friction and wear of WC-based and ZrO<sub>2</sub>-based composites [J]. *Wear*, 2011, 271(9/10): 1951-1961.

[4] 温雪龙, 巩亚东, 巴德纯. 石英玻璃微尺度磨削温度仿真与实验研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(2): 249-253.

(Wen Xue-long, Gong Ya-dong, Ba De-chun. Simulation and experimental research on grinding temperature of micro-grinding quartz glass [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2017, 38(2): 249-253.)

[5] Liu Y Y, Deng J X, Wu F F, et al. Wear resistance of carbide tools with textured flank-face in dry cutting of green alumina ceramics [J]. *Wear*, 2017, 372/373(1): 91-103.

[6] Song W L, Deng J X, Zhang H, et al. Performance of a cemented carbide self-lubricating tool embedded with MoS<sub>2</sub> solid lubricants in dry machining [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2011, 13(1): 8-15.

[7] Ji L, Yan Y, Bao Y, et al. Crack-free cutting of thick and dense ceramics with CO<sub>2</sub> laser by single-pass process [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2008, 46(10): 785-790.

[8] Huang Q, Bando Y, Xu X, et al. Enhancing super plasticity of engineering ceramics by introducing BN nanotubes [J]. *Nanotechnology*, 2007, 48(18): 485706-485707.

[9] Ma L J, Yu A B, Chen J. Theoretical model of cutting force in turning the lithium disilicate glass-ceramics [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(9/10/11/12): 4355-4366.

[10] Ma L J. Study on influencing of technological parameter with tools wear during turning fluorophlogopite glass-ceramics [J]. *Key Engineering Materials*, 2008, 375/376: 421-424.

[11] 郑敏利, 范依航. 高速切削典型难加工材料刀具摩擦与磨损机理研究现状[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2011, 16(6): 22-30.

(Zheng Min-li, Fan Yi-hang. An overview of tool friction and wear behavior in high-speed machining-typical difficult-to-cut material [J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2011, 16(6): 22-30.)

[12] 郑欣. 二硅酸锂微晶玻璃的制备及力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

(Zheng Xin. Preparation and mechanical properties of lithium disilicate glass-ceramics [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.)