

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.07.008

氧化锆陶瓷车削刀具磨损机理及理论模型

马廉洁^{1,2}, 左宇辰¹, 王馨¹, 杨登峰²

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

摘 要: 通过不同刀具几何参数的 YG6 刀具车削氧化锆实验,研究了工程陶瓷切削刀具体积磨损理论模型.从强度理论和刀具磨损材料迁移的本质出发,将刀具的二维磨损推广至三维磨损.基于黏着效应机制,研究了氧化锆陶瓷车削的刀具磨损机理.通过力学分析,采用逐层积分法,综合了刀具几何参数与后刀面磨损面积之间关系,建立了刀具体积磨损理论模型.验证实验结果表明,刀具体积磨损量随前角或后角的变大先减小后增大,随刀尖圆弧半径的变大而减小,刀具体积磨损的模型理论值与实验值趋势一致,平均相对误差为 4%~15%,说明模型具有较高的可靠性.

关 键 词: 黏着效应;刀具磨损;氧化锆陶瓷;理论模型;车削

中图分类号: TH 117.1; TG 501.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2020)07-0955-07

Tool Wear Mechanism and Theoretical Model of Zirconia Ceramic Turning

MA Lian-jie^{1,2}, ZUO Yu-chen¹, WANG Xin¹, YANG Deng-feng²

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China.
Corresponding author: MA Lian-jie, E-mail: bcmlj1025@163.com)

Abstract: Through the experiment of YG6 tool turning zirconia with different tool geometric parameters, the theoretical model of tool volume wear was studied in engineering ceramic turning. Starting from strength theory and the essence of tool wear material migration, tool wear scale was extended from two-dimensional wear to three-dimensional wear. Based on the adhesion effect mechanism, the tool wear mechanism of zirconia ceramic turning was studied. Based on mechanical analysis, and adopting the method of layer by layer integration, the relationship between the tool geometric parameters and the flank wear area was synthesized, and the theoretical model of tool volume wear was established. Verification experiment results showed that tool volume wear decreases firstly and increases afterward with the increase of the rake angle and back angle, and decreases with the increase of the corner radius. The theoretical value of tool volume wear is consistent with the experimental results, and the average relative error is 4%~15%, which indicates that the model has high reliability.

Key words: adhesion effect; tool wear; zirconia ceramic; theoretical model; turning

工程陶瓷材料具有化学性能稳定和力学性能优良的特点,在军工、航空航天和生物医学等领域得到广泛的应用^[1-4].然而因其硬脆性,致使加工困难且加工损伤大,易造成严重的刀具磨损.而刀具状态的变化直接影响切削过程中的切削力、切削温度、尺寸公差和表面粗糙度等,致使加工质量不理想^[5-8].因此在加工脆性材料的过程中,预测

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生产效率具有重要意义.迄今为止,国内外关于刀具磨损的主要研究方向为刀具磨损与影响因素之间关系分析^[9-12]和基于智能算法的刀具磨损预测模型建立^[13-14].然而,对于陶瓷等脆性材料车削加工刀具磨损理论建模的研究鲜有涉及.

脆性域与塑性域车削加工中材料的去除过程表现出极大的差异,脆性域车削去除过程主要以微裂纹扩展为主,而塑性域则以延性挤压撕裂为主^[15]. 因此基于脆性材料车削的刀具磨损模型不可完全参考塑性材料车削. 而车削作为工程陶瓷高效率低成本的加工方式,严重的刀具磨损成为该加工方式广泛应用的障碍之一,且迄今为止尚未有良好适用于陶瓷材料车削刀具磨损的理论模型.

本文基于黏着效应机制,研究了车削氧化锆陶瓷时刀具的磨损机理,通过力学分析,建立了氧化锆陶瓷车削的刀具体积磨损理论模型,通过 YG6 刀具车削氧化锆陶瓷实验,对模型的精度加以验证.

1 硬脆材料车削时刀具的磨损机理

工程陶瓷切削过程中的微裂纹扩展最终导致材料去除,由于晶体相的不规则分布容易造成晶体间互锁,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,形成许多微小的凸起粗糙峰. 如图 1 所示,在微观下,刀具和工件的实际接触面积只占表观面积的极小的一部分,因此界面上的微凸体接触将产生很大的应力,当达到刀具屈服极限 σ_s 时会发生塑性变形,微凸体相对滑动时,这些接触点产生剪切作用,造成刀具磨损中的刀具材料迁移现象,此即黏着效应.

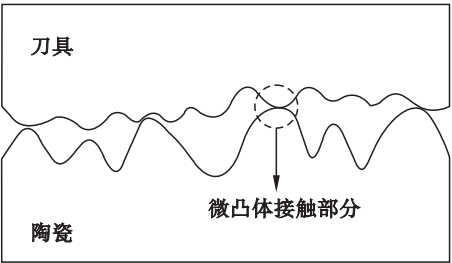


图 1 微观下刀具工件的接触界面示意图
Fig. 1 Schematic diagram of contact interface of the tool workpiece under microscopic conditions

如图 2 所示,在法向载荷 W 作用下,微凸体接触峰点处的应力达到刀具软材料屈服极限 σ_s 而产生塑性变形. 随后刀具工件相对运动,在剪切力 T 的作用下,黏着结点被剪切,造成刀具材料迁移,即刀具发生黏着磨损.

黏着结点处的法向载荷 F_v 和剪切力 T 分别为

$$F_v = S_a \sigma_s, \tag{1}$$

$$T = S_a \tau_b. \tag{2}$$

式中: σ_s 为刀具材料屈服极限; τ_b 为刀具材料剪切强度极限; S_a 为黏着结点接触面积.

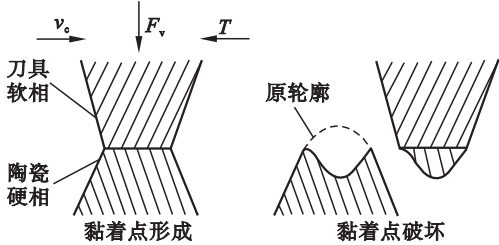


图 2 刀具的黏着磨损模型
Fig. 2 Adhesive wear model of the tool

由黏着效应,单个粗糙峰滑动时的摩擦力为剪切力,即

$$f = S_a \tau_b. \tag{3}$$

则摩擦系数为

$$\mu = \frac{f}{F_v} = \frac{S_a \tau_b}{S_a \sigma_s} = \frac{\tau_b}{\sigma_s}. \tag{4}$$

考虑到刀具材料的各向异性,引入修正系数 k_p ,修正后的摩擦系数为

$$\mu = k_p \frac{\tau_b}{\sigma_s}. \tag{5}$$

式中, k_p 为刀具材料各向异性修正系数.

2 硬脆材料车削刀具体积磨损量理论模型

2.1 刀具体积磨损量

刀具磨损到一定程度后便无法进行有效加工,此磨损限度称为磨钝标准. 通常,刀具在参与加工时后刀面都会产生磨损,其磨损形态对加工误差、切削力、切削温度及表面粗糙度等都有较前刀面磨损更为显著的影响,同时后刀面磨损量易于测量,因此一直以来,在关于刀具磨损的研究中,以后刀面磨损宽度作为主要研究指标.

然而,该磨钝标准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,存在如切削刃崩碎而产生的刀具失效,此时后刀面磨损宽度 (W_b) 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,将局部上升至全局,引入刀具体积磨损量 (V_t),如图 3 所示. 体积磨损量在弥补后刀面磨损宽度不足之外,还更贴切地描述了刀具磨损材料迁移的本质,更加科学地考察了刀具强度与磨损的关系,简洁直观,易于测量.

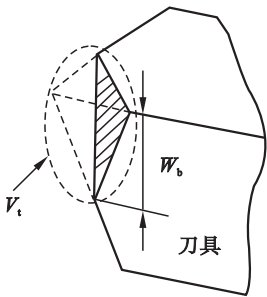


图 3 刀具体积磨损量 V_t 模型
Fig. 3 Model of tool volume wear V_t

2.2 刀尖后刀面磨损面积

脆性材料干车削中,由于刀具磨损导致刀尖圆弧变直,不断形成的新切削刃向原刀尖圆弧中心 o 移动,主后刀面与副后刀面的交线长度 L 变短(如图 4a 所示),使得刀尖与工件进行面接触摩擦.刀具的磨损面可近似为半椭圆面(如图 4b 所示),设该半椭圆短半轴长为 a ,长半轴长为 b ,根据几何关系得

$$a = \sqrt{r^2 - (r-l)^2}, \quad (6)$$

$$b = W_b. \quad (7)$$

式中: r 为刀尖圆弧半径; l 为前刀面上径向磨损长度; W_b 为后刀面磨损宽度.

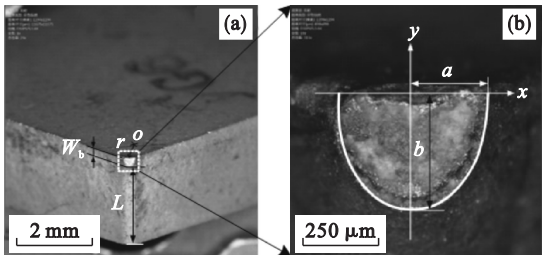


图 4 刀尖磨损形态模型
Fig. 4 Model of tool tip wear morphology
(a)—刀尖磨损部位;(b)—刀具的磨损面放大图.

所以后刀面磨损面积 S 为

$$S = \frac{1}{2} \pi ab = \frac{1}{2} \pi W_b \sqrt{r^2 - (r-l)^2}. \quad (8)$$

考虑切削时刀具后角通常为正,而前角有正有负,因此分情况讨论前角为正和为负时, W_b 和 h 存在的关系.

1) 前角为负时,刀具的体积磨损量如图 5 所示.

$$W_b = \overline{DE} + \overline{DB} = h(\cot \alpha_o - \tan \gamma_o). \quad (9)$$

式中: h 为刀尖磨损深度; γ_o 为刀具前角; α_o 为刀具后角.

2) 前角为正时,刀具的体积磨损量如图 6 所示.

$$W_b = \overline{DE} - \overline{DB} = h(\cot \alpha_o - \tan \gamma_o). \quad (10)$$

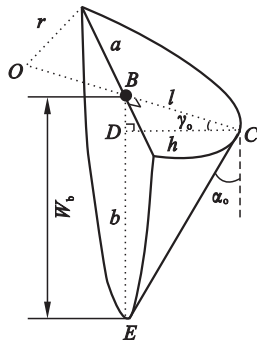


图 5 前角为负
Fig. 5 Negative rake angle

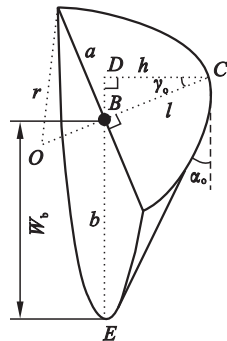


图 6 前角为正
Fig. 6 Positive rake angle

综合式(9)和(10),有如下关系:

$$W_b = h(\cot \alpha_o - \tan \gamma_o). \quad (11)$$

从图 5 和图 6 可以看出 l 和 h 存在的关系为

$$l = \overline{CD} \sec \gamma_o = h \sec \gamma_o. \quad (12)$$

故后刀面磨损面积 S 为

$$S = \frac{\pi h}{2} (\cot \alpha_o - \tan \gamma_o) \sqrt{2rh - h^2}. \quad (13)$$

因 $h \ll r$,故后刀面磨损面积 S 为

$$S = \frac{\pi \sqrt{2r \sec \gamma_o}}{2} (\cot \alpha_o - \tan \gamma_o) h^{\frac{3}{2}}. \quad (14)$$

2.3 硬脆材料车削刀具体积磨损量理论模型

由于工件已加工表面、过渡表面与刀具后刀面间存在着剧烈的摩擦,在后刀面毗邻切削刃的地方很快被磨出后角为零的小片薄层磨损面(即图 7 中的 II 区).此磨损在一定程度上提高了刀具的抗冲击、抗交变应力以及抗磨损的能力,但同时影响到最为关键的工件加工质量.刀具磨损无可避免,为发挥刀具的最大经济效益,需研究工件可接受加工误差内刀具的最大磨损量.而影响加工误差、切削力、切削温度及表面粗糙度等参数的主要因素在于刀尖部分的后刀面磨损(即图 7 中的 I 区),且相对于 II 区的薄层磨损来说, I 区占据绝大部分的磨损体积.因此对 I 区磨损体积进行建模研究具有核心意义.

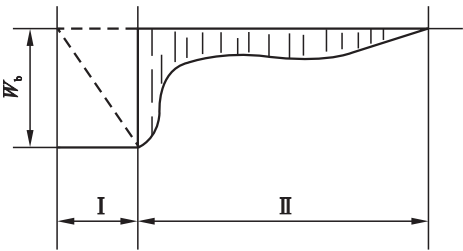


图 7 后刀面磨损形态示意图
Fig. 7 Schematic diagram of flank wear morphology

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,刀尖磨损体呈“贝壳”状三维体(如图 8 所示),考虑到刀具的有效加工,刀尖 I 区不会扩展到刀尖圆弧半径以外,故该磨损体体积与刀具主偏角 k_r 及副偏角 k'_r 无关。

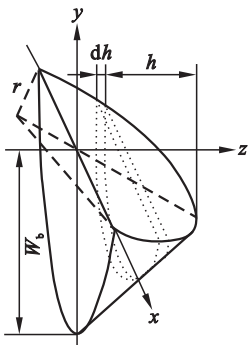


图 8 刀尖体积磨损几何形态
Fig. 8 Geometry morphology of tool tip volume wear

由图 8 可得,刀尖总体积磨损量为

$$V_t = \int_0^{h_{\max}} S dh. \tag{15}$$

刀尖受力情况如图 9 所示,刀尖与工件挤压时,其剪切力 F_t 主要来源于刀尖处磨损面与工件表面之间的摩擦力 f_k 和主切削力 F_c 的合力,当刀尖处的剪切力 F_t 达到刀具的屈服极限 δ_s 时,刀尖发生块状剥落。

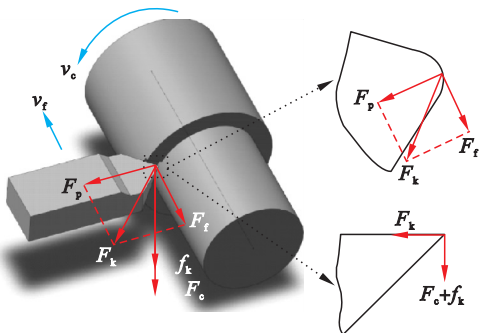


图 9 刀尖受力示意图
Fig. 9 Schematic diagram of the tool tip force

刀尖处磨损面与工件表面之间的摩擦力 f_k 为

$$f_k = \mu F_k = \mu \sqrt{F_p^2 + F_f^2}. \tag{16}$$

故刀尖剪切应力 σ_t 为

$$\sigma_t = \frac{F_t}{S} = \frac{F_c + f_k}{S} = \frac{F_c + \mu \sqrt{F_p^2 + F_f^2}}{S}. \tag{17}$$

该剪切应力致使刀尖材料被迁移,将式(14)代入式(17)得刀具磨损深度 h .

$$h = \left(\frac{2(F_c + \mu \sqrt{F_p^2 + F_f^2})}{\pi \sigma_s (\cot \alpha_o - \tan \gamma_o) \sqrt{2r \sec \gamma_o}} \right)^{\frac{2}{3}}. \tag{18}$$

综合式(5)、式(14)、式(15)和式(18)即可得出车削硬脆性材料时的刀尖体积磨损量 V_t 为

$$V_t = \frac{2}{5(\pi \sigma_s \sqrt{2r})^{\frac{2}{3}}} \left(F_c + k_p \frac{\tau_b}{\sigma_s} \sqrt{F_f^2 + F_p^2} \right)^{\frac{5}{3}} \times ((\cot \alpha_o - \tan \gamma_o) \sqrt{\sec \gamma_o})^{-\frac{2}{3}}. \tag{19}$$

3 硬脆材料车削刀具体积磨损量理论模型的验证

在 CAK5085D 型数控车床上进行干式外圆车削实验,工件为预先精车为直径 22 mm 的氧化锆陶瓷棒料. 选用 YG6 硬质合金车刀,刀具屈服极限 σ_s 为 210 MPa, YG6 刀具主要由 WC, Co 粉末冶金工艺制造,其 k_p 值为 1.55. 以前角 γ_o 、后角 α_o 、刀尖圆弧半径 r 为变量进行单因素实验,实验条件如表 1 所示. 刀具体积磨损量用 DSX110 型 3D 激光共聚焦显微镜测量实验前后刀尖体积的变化量. 采用瑞士 Kistler 公司生产的六分量切削力测试系统对车削力进行测量。

表 1 车削氧化锆陶瓷实验参数			
Table 1 Experiment parameters of zirconia ceramic turning			
实验编号	前角 γ_o ($^\circ$)	后角 α_o ($^\circ$)	刀尖圆弧半径 r mm
1 ~ 8	-24, -19, -14, -9, -4, 1, 6, 11	19	0.5
9 ~ 16	-9	7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28	0.5
17 ~ 24	-9	19	0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2

4 结果与讨论

4.1 刀具磨损形态

用 OLYMPUS 超景深显微镜对车削后的

YG6 刀片进行刀具形貌拍摄. 为明确不同程度的磨损对刀具形态的影响,分梯度选取不同磨损体积的刀具进行拍摄,磨损形态如图 10 所示.

可见后刀面磨损较为严重,磨损面宏观呈半椭圆状,磨损体积越大,其半椭圆区域面积越大,从磨损表面可见其表面粘附有白色的陶瓷颗粒,此即由黏着效应所致. 从前刀面图(如图 10d、图 10h 和图 10f 所示)可见,6 号、8 号和 9 号实验的前刀面发生了不规则的脆性剥落,且磨损体积越大,脆性剥落越严重,这是切削过程中,刀具前刀面受到周期性变化的冲击载荷和热应力所致的.

4.2 前角对刀具体积磨损量的影响

图 11 所示为 YG6 刀具体积磨损量实验值与理论值随前角的变化关系. 利用相对误差法计算得到平均相对误差为 13. 91%. 当前角为 $-24^{\circ} \sim -9^{\circ}$ 时,刀具体积磨损量随着前角增大而缓慢减小,这是因为切削力随着前角的增大而减小,刀尖所承受的冲击载荷逐渐减小,所以刀具磨损较小;在前角为 -9° 时,理论值和实验值同时达到极小值,此后继续增大前角,车床振动加剧,刀具刃缘崩碎明显,刀具体积磨损量急剧增加,很快导致刀具失效. 因此用 YG6 刀具车削氧化锆陶瓷时宜将前角控制在 -9° 左右.

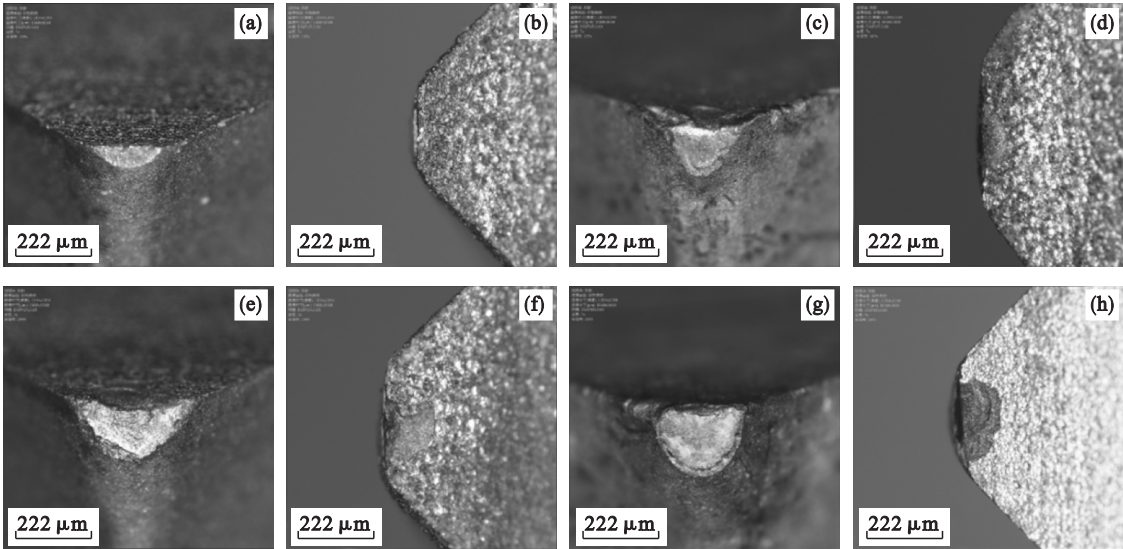


图 10 四种实验条件下的 YG6 刀尖磨损形态
Fig. 10 Wear morphology of YG6 tool tips under four experimental conditions

(a)—实验 20, $V_t = 0.09 \text{ mm}^3$,后刀面; (b)—实验 20, $V_t = 0.09 \text{ mm}^3$,前刀面; (c)—实验 6, $V_t = 0.43 \text{ mm}^3$,后刀面; (d)—实验 6, $V_t = 0.43 \text{ mm}^3$,前刀面; (e)—实验 9, $V_t = 0.68 \text{ mm}^3$,后刀面; (f)—实验 9, $V_t = 0.68 \text{ mm}^3$,前刀面; (g)—实验 8, $V_t = 0.98 \text{ mm}^3$,后刀面; (h)—实验 8, $V_t = 0.98 \text{ mm}^3$,前刀面.

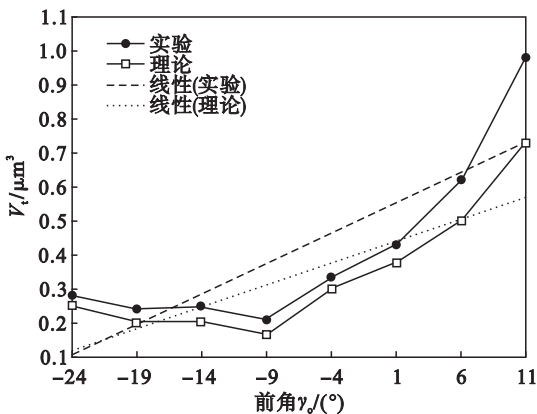


图 11 刀具体积磨损量随前角的变化曲线
Fig. 11 Effect of rake angle on tool volume wear

4.3 后角对刀具体积磨损量的影响

图 12 所示为 YG6 刀具体积磨损量实验值与

理论值随后角的变化关系. 理论值与实验值线性趋势线平行度相对较低,平均相对误差为 14. 28%. 当后角过小时,刀具的后刀面与已加工表面的接触区域较大,摩擦剧烈,产生大量的热应力在刀具切出工件时被释放,由于陶瓷车削的特点是切削和空切交替进行,造成热应力疲劳,易使刀具表面萌生裂纹,加剧了刀具磨损. 随着后角的增大,摩擦接触区域减小,刀具磨损显著改善,在后角为 22° 时,刀具体积磨损达到极小值,此后继续增大后角,刀尖的强度和体积均减小,切削刃易崩碎,且切削热集中于刀尖处不易散出,致使刀具磨损变大. 故用 YG6 刀具车削氧化锆陶瓷宜将后角控制在 22° 左右.

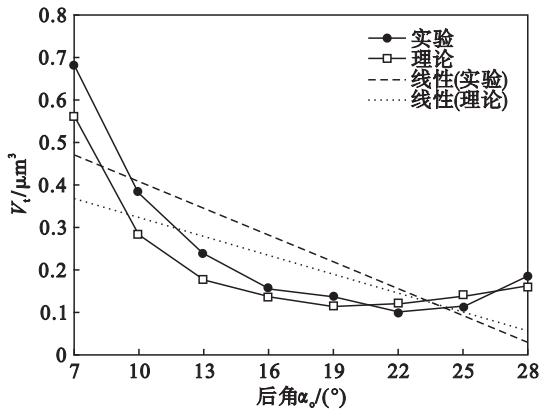


图 12 刀具体积磨损量随后角的变化曲线
Fig. 12 Effect of back angle on tool volume wear

4.4 刀尖圆弧半径对刀具体积磨损量的影响

图 13 所示为 YG6 刀具体积磨损量实验值与理论值随刀尖圆弧半径的变化关系. 可见理论值与实验值线性趋势线平行度较高, 且二者距离较近, 平均相对误差为 4.7%. 刀具磨损整体上呈下降趋势, 当刀尖圆弧半径为 0.5 ~ 0.8 mm 时, 刀具体积磨损量减大幅度较大, 主要是由于刀尖圆弧半径较小时, 刀尖抗冲击载荷能力差, 故刀具磨损较大, 此后继续增大刀尖圆弧半径, 刀尖圆弧部分与工件切削层的作用面积增大, 刀尖的受力更加均衡, 且此时刀尖的强度也较高, 因此刀具的耐磨性更高. 故用 YG6 刀具车削氧化锆陶瓷时宜将刀尖圆弧半径控制在 1.2 mm 左右.

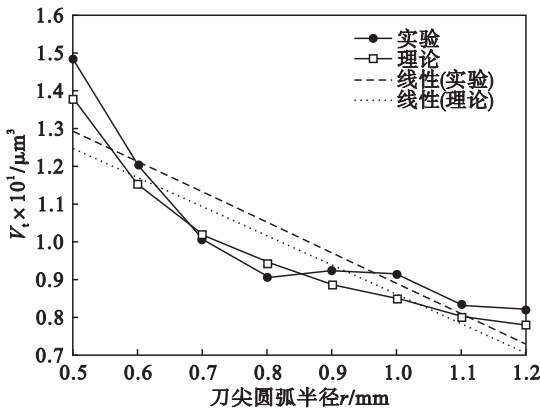


图 13 刀具体积磨损量随刀尖圆弧半径的变化曲线
Fig. 13 Effect of corner radius on tool volume wear

综上所述, 分析刀具几何参数对刀具体积磨损量的影响曲线, 发现前角和后角相较于刀尖圆弧半径对刀具磨损的影响更为显著. 在理论值与实验值趋势吻合良好的情况下, 理论值普遍比实验值低, 其原因是: 刀尖体积磨损量实际测量时, 包含了前刀面区域的磨损体积, 而本模型忽略了前刀面的体积磨损量, 在实际情况下, 由于前刀面

受冲击载荷和热应力的作用, 发生了不规则的脆性剥落, 进而造成在某些实验条件下实验值相对于理论值偏大. 分析前角、后角和刀尖圆弧半径变化下的刀具体积磨损量理论值与实验值的平均相对误差, 可预测刀具前刀面磨损所造成的体积磨损量约占刀具总体积磨损量的 4% ~ 15%.

5 结 论

1) 氧化锆陶瓷干式车削过程中, 刀具与工件相接触的微凸体在挤压变形和滑动剪切的作用下, 使刀具材料发生了迁移, 即造成了刀具的黏着磨损.

2) 将刀具的二维磨损推广至三维磨损, 更科学地考察了刀具强度与磨损的关系, 更贴切地描述了刀具磨损材料迁移的本质, 更加直观地反映了刀具的磨钝情况.

3) 氧化锆陶瓷车削的刀具体积磨损量, 随前角或后角的变大先减小后增大; 随刀尖圆弧半径的变大而减小. 刀具体积磨损理论模型较好地反映了刀具磨损的变化趋势, 模型预测值和实验值的平均相对误差处于合理的范围内, 模型的可靠性较高.

参考文献:

[1] Fledrich G, Palinkas I, Keresztes R, et al. Turning specialties of ZrO₂ ceramics[J]. *Sustainable Construction and Design*, 2011, 2(1): 59 – 65.

[2] Yang Z, Zhu L, Ni C, et al. Investigation of surface topography formation mechanism based on abrasive-workpiece contact rate model in tangential ultrasonic vibration-assisted CBN grinding of ZrO₂ ceramics [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 155: 66 – 82.

[3] Xiao X, Zheng K, Liao W, et al. Study on cutting force model in ultrasonic vibration assisted side grinding of zirconia ceramics[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, 104: 58 – 67.

[4] 屈硕硕, 巩亚东, 杨玉莹, 等. 单向碳纤维增强陶瓷基复合材料磨削表面质量研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(9): 1310 – 1315.

(Qu Shuo-shuo, Gong Ya-dong, Yang Yu-ying, et al. Study on grinding surface quality of unidirection carbon fiber-reinforced ceramic matrix composites [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2019, 40 (9): 1310 – 1315.)

[5] Zhang C, Liu X, Fang J, et al. A new tool wear estimation method based on shape mapping in the milling process[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 53(1/2/3/4): 121 – 130.

[6] 石莉, 巩亚东, 姜增辉, 等. S30T 正交车铣 TC4 钛合金磨削形貌及机理分析[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(8): 1133 – 1136.

(Shi Li, Gong Ya-dong, Jiang Zeng-hui, et al. Experimental

-

北京:北京交通大学,2019.

- [10] Turian J, Ratinov L, Bengio Y. Word representations: a simple and general method for semi-supervised learning [C]//Proceedings of the 48th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. Uppsala, 2010: 384-394.
- [11] 许飞飞, 应俊, 宋亚男, 等. 基于深度学习的慢性阻塞性肺病与哮喘-慢性阻塞性肺疾病重叠分类[J]. 中华医学图书情报杂志, 2019, 28(2): 45-49.
(Xu Fei-fei, Ying Jun, Song Ya-nan, et al. Deep learning-based classification of chronic obstructive pulmonary disease and asthma-chronic obstructive pulmonary disease overlap syndrome [J]. *Chinese Journal of Medical Library and Information Science*, 2019, 28(2): 45-49.)
- [12] 周阳. 基于机器学习的医疗文本分析挖掘技术研究[D]. (Zhou Yang. Research on medical text analysis and mining technology based on machine learning [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.)
- [13] 孟曼, 韦庆玥, 陈时光. 医疗文本分类机器学习方法研究[J]. 计量与测试技术, 2018, 45(12): 66-69.
(Meng Man, Wei Qing-yue, Chen Shi-guang. A study of machine learning algorithms applied to medical text classification [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2018, 45(12): 66-69.)
- [14] Lodhi H, Saunders C, Shawe-Taylor J, et al. Text classification using string kernels [J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2002, 2(3): 419-444.
- [15] Aggarwal C, Zhai C. A survey of text classification algorithms[M]. Boston: Springer, 2012: 163-222.