

基于离散元法的 Al_2O_3 基陶瓷刀具失效机理分析

赵百强,谷美林,刘蕊,杜浩,谷婷婷

河北工业大学

摘要: 本文基于离散元法,利用 PFC2D 软件分别建立陶瓷材料和工件材料真实的离散元模型,模拟氧化铝基陶瓷刀具在加工 45 钢的过程中刀具裂纹的形成、扩展及材料剥落的演化过程。采用单因素法分析了切削深度、切削速度、刀具前角和不同氧化铝基陶瓷材料对刀具磨损的影响,为提高加工质量和合理选择加工参数提供依据。结果表明:在一定范围内增大切削速度可以降低磨损量,提高加工效率;切削加工时应尽量选取合适的切削深度以减少刀具的磨损和延长刀具使用寿命,即采用小切削深度;刀具前角为 -6° 时可以获得更好的加工质量,并减少刀具磨损。

关键词: 氧化铝基陶瓷刀具;刀具磨损;离散元法模拟;磨损量

中图分类号: TG54;TH14

文献标志码: A

Analysis on Tool Wear Mechanism of Al_2O_3 -Based Ceramic Cutting Tool Based on Discrete Element Method

Zhao Baiqiang, Gu Meilin, Liu Rui, Du Hao, Gu Tingting

Abstract: Based on the discrete element method and PFC2D software, the BPM models of ceramic material and of work-piece material are established. The evolution process of material peeling off and the crack extension is simulated. By using the single factor method, the cutting depth, cutting speed, cutting tool rake angle and different alumina ceramic material effects on tool wear are analyzed. The basis for improving the processing quality and choosing reasonable processing parameters is provided by this method. The results show that the increase of cutting speed can reduce the wear amount and improve the processing efficiency in a certain range. The right cutting depth to reduce attrition quantity, extend the service life of cutting tools should be chosen in machining, and the small cutting depth is used. In order to reduce tool wear and get the better processing quality of work-piece, the rake angle -6° is the advisable choice. With increase of fracture toughness and the hardness of tools, the tool wear quantity is decreased.

Keywords: alumina ceramic cutting tools; tool wear; discrete element method simulation; attrition quantity

1 引言

Al_2O_3 基陶瓷刀具具有较好的化学稳定性,良好的耐磨性和优异的耐热性,且价格低廉,被广泛用

于钢材料的切削加工,是目前使用最多的陶瓷刀具之一^[1]。氧化铝基陶瓷刀具脆性大,抗弯强度和耐冲击性能差,当切削温度发生突然改变时,容易出现裂纹、局部脱落和破损现象^[2]。

国内外学者对不同切削条件与刀具破损磨损的关系进行了研究。徐亮^[3]通过大量实验研究了不

收稿日期: 2017 年 7 月

[2] 邱成果,王元化. 材料的物理性能[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2001.

[3] 张维纪. 金属切削原理与刀具[M]. 杭州:浙江大学出版社,1998.

[4] 付海. 热喷涂焊层车削加工工艺的探讨[J]. 现代机械, 2004(4):92-93.

[5] 蒋铁军. 车削加工振动断屑法[J]. 金属加工(冷加工), 2000(12):9.

[6] 张文东,刘哲,穆宏兵. 车削加工中振动产生原因及消除措施[J]. 机械研究与应用,2002,15(2):21-23.

[7] 王梅香. 细长轴车削新工艺[J]. 煤矿机械,2008,29(10):91-92.

[8] 陈祖安. 车削加工的切削用量优化设计[J]. 现代制造工程,1995(1):27-28.

[9] 高琪,祖英利,王金贵. 基于车削加工的误差分析及其补偿研究[J]. 煤矿机械,2010,31(1):127-130.

[11] 李继平. 复杂零件的车削加工工艺[J]. 科技信息:学术研究,2008(32):154.

第一作者:张亚双,高级工程师,中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司,110043 沈阳市

First Author: Zhang Yashuang, Senior Engineer, AECC Shenyang Liming Aero Engine corporation LTD, Shenyang 110043, China

同切削速度下 TBw、ZBw 刀具的磨损情况; S. K. Bhattacharyya 等^[4]、G. Brandt 等^[5]采用实验方法研究了不同陶瓷刀具在不同切削条件下加工 Inconel718 时刀具磨损过程和刀具磨损机理; 程欢欢^[6]利用库伦摩擦模型对切削过程中应力、应变和温度进行模拟, 并分析了切削参数和刀具磨损的关系; Lorentzon J. 等^[7]利用有限元法模拟得到了切削力、切削温度、刀一屑间相对运动速度的变化规律; 姜胜强^[8]采用离散元方法模拟分析了磨削过程中裂纹扩展过程、切削力的变化情况以及预应力对裂纹扩展的影响; 张成^[9]应用离散元法建立了刀具一切屑模型, 分析了预应力、切削速度和背吃刀量与刀具磨损的关系。通过上述研究发现, 离散元法在研究陶瓷刀具磨损方面具有明显的优势, 能够实时模拟和监测刀具断裂损伤和裂纹形成及扩展情况。

本文利用 PFC2D 模拟软件模拟了氧化铝基陶瓷刀具加工 45 钢的过程中刀具裂纹的形成、扩展及材料剥落的演化过程, 研究了切削深度、切削速度、刀具前角和不同氧化铝基陶瓷材料对刀具磨损的影响。

2 离散元模拟的建立与校准

2.1 建立离散元模型

离散元法是把非连续介质看成有限个刚性元素的集合, 通过对相邻两个单元间连接属性的设置使单元间存在一种或几种作用力, 然后采用力与位移法则以及牛顿学第二定律得到任意时刻各个元素的位移、速度、角速度和转角等。

PFC2D 软件是一种二维颗粒流模拟程序, 通过离散元法来模拟圆形颗粒介质间的运动以及相互作用^[10]。为建立与氧化铝基陶瓷材料和 45 钢材料微观结构相似的 BPM 模型, 基于 PFC2D 软件, 采用半径膨胀法创建指定孔隙率的离散元模型。

2.2 离散元模型的校准

离散元模型中, 通过设置颗粒和平行键的微观参数来定义材料的力学性能。这些微观参数无法通过实验法测得, 目前也没有方法(或理论)能够直接将材料的宏观力学性能与微观参数匹配起来, 只能通过校准实验对模型参数进行反复调试和设置, 最终获得微观参数与宏观力学性能之间的关系。

本文分别通过单轴压缩实验、巴西实验、断裂韧性实验以及三点弯曲试验校准陶瓷材料 BPM 模型, 采用拉伸试验力校准 45 钢材料的 BPM 模型。校准结果见表 1 和表 2。

表 1 Al_2O_3 、 $Al_2O_3 - TiC$ 、 $Al_2O_3 - SiC$ 陶瓷材料离散元模型与实测主要力学性能

力学特性		弹性模量 E (GPa)	泊松比 ν
$Al_2O_3 - TiC$ 陶瓷材料	文献结果	400	0.23
	模拟结果	413	0.22
	相对百分比 (%)	3.25	4.35
$Al_2O_3 - SiC$ 陶瓷材料	文献结果	390	0.25
	模拟结果	406	0.243
	相对百分比 (%)	4.1	2.8
Al_2O_3 陶瓷材料	文献结果	390	0.21
	模拟结果	403	0.22
	相对百分比 (%)	3.3	4.8
弯曲强度 σ_{13} (MPa)	断裂韧性 k_{1C} ($MPa \cdot m^{1/2}$)	巴西拉伸强度 σ_t (MPa)	
600	5.4	179	
583	5.49	185	
2.8	1.7	3.35	
800	9	214	
786	8.67	231	
1.75	3.7	7.9	
350	4.5	161	
372	4.81	172	
6.3	6.6	6.8	

表 2 45 钢材料离散元模型与实测主要力学性能

力学特性	弹性模量 E (GPa)	泊松比 ν	抗拉强度 σ_b (MPa)
文献结果	210	0.3	600
模拟结果	212	0.287	613
相对百分比	0.95%	4.3%	2.2%

3 刀具磨损破损的二维离散元模拟

根据校准的 $Al_2O_3 - TiC$ 陶瓷刀具材料以及 45 钢工件材料离散元模型建立如图 1 所示的刀具—工件的二维离散元模型。工件长度 80mm, 高度 15mm, 包含 13640 个颗粒, 这些颗粒由三面墙包围。刀具尺寸 12.7mm × 12.7mm, 包含 5725 个颗粒。由于模拟过程需要加入温度场, 颗粒膨胀, 因此这些颗粒由边界颗粒包围。对于刀具内的颗粒, 当 $\bar{\tau} \geq \bar{\tau}_c$ 或 $\bar{\sigma} \geq \bar{\sigma}_c$ 时, 颗粒间的平行键断裂时视为微裂纹产生; 颗粒上无连接平行键时视为脱落颗粒。当前刀面上的裂纹逐渐延伸到后刀面并发生局部层状剥落时, 形成刀具后刀面的磨损。

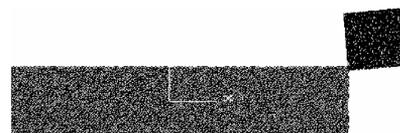
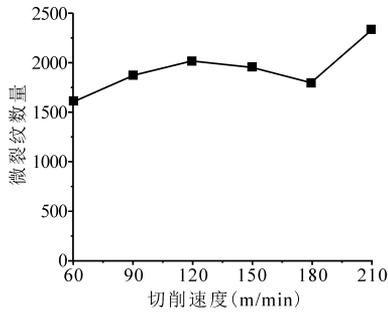


图 1 刀具—工件的二维离散元模型

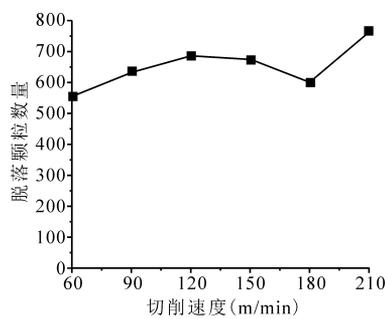
借助单因素实验法分析切削速度、背吃刀量、刀具前角以及刀具材料对裂纹数目、切削力、脱落颗粒以及磨损量的影响。

3.1 切削速度的影响

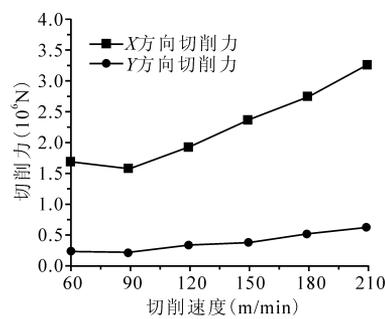
图2为不同切削速度下微裂纹数量、脱落颗粒数量、切削力及刀具磨损量变化的规律。



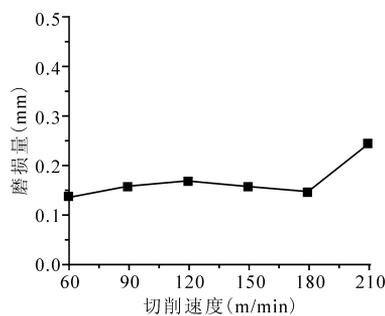
(a) 微裂纹数随切削速度变化曲线



(b) 脱落颗粒数随切削速度变化曲线



(c) 切削力随切削速度变化曲线



(d) 磨损量随切削速度变化曲线

图2 不同切削速度模拟曲线

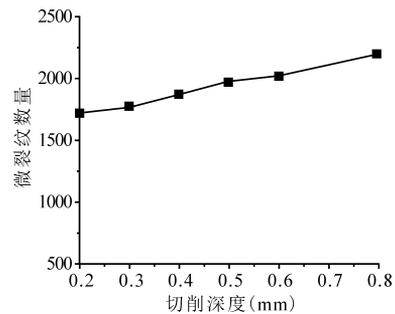
从图2a和图2b可知,切削速度从60m/min增大到120m/min时,刀具的微裂纹数和脱落颗粒呈增长趋势;随着切削速度增大到180m/min,刀具的微裂纹数和脱落颗粒逐渐下降,脱落颗粒数和微裂纹数急剧增大。从图2c中可知,X、Y方向上的平均切削力随着切削速度的增大先减小后增大。从图

2d可知,随着切削速度的增大,刀具磨损量先增大后减小,最后急剧增长,与微裂纹数和脱落颗粒数的变化趋势相似。

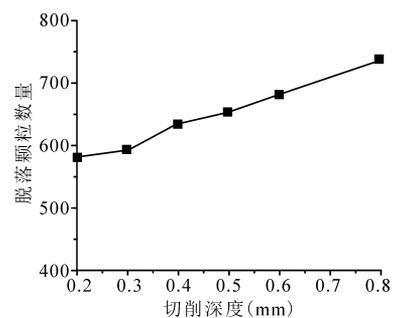
通过上述分析可知,在一定的切削速度范围内,微裂纹数、脱落颗粒以及刀具的磨损量随着切削速度的增加不断减小;切削速度较低时,磨损量小,考虑到切削速度低时加工效率低,因此可以适当选择较高的切削速度。

3.2 切削深度的影响

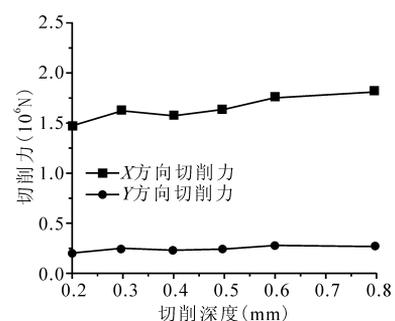
图3为微裂纹数量、脱落颗粒数量、切削力以及磨损量随切削深度变化的曲线图。由图3a、图3b和图3d可知,随着切削深度的增加,刀具的微裂纹数量、脱落颗粒的数量及不断增加;由图3c可知,随着切削深度的增加,X方向平均切削力值先增大后变小,然后又随着切削深度的增加而增加,但是增大和减小的幅度不大,这可能是由于在0.3mm时刀具的裂纹增长率较大引起的。Y方向平均切削力随着切削深度的增加不断增加,增长较缓慢。



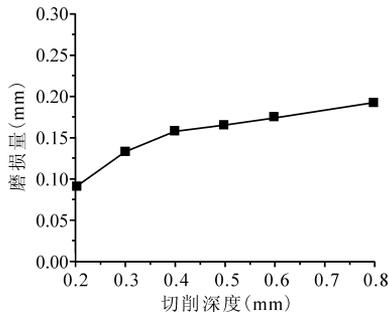
(a) 微裂纹数随切削深度变化曲线



(b) 脱落颗粒数随切削深度变化曲线



(c) 切削力随切削深度变化曲线



(d) 磨损量随切削深度变化曲线

图3 不同切削深度模拟曲线

随着切削深度的增加,刀具的磨损量增大,故在切削加工时应尽量选取合适的切削深度,以减少刀具的磨损和延长刀具使用寿命,即宜采用较小的切削深度。

3.3 刀具前角的影响

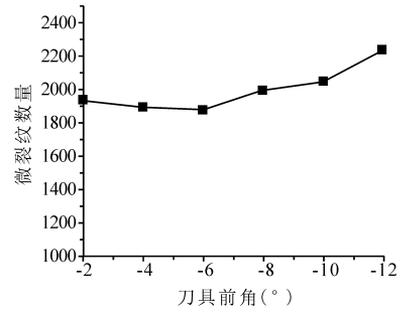
在模拟切削过程中,刀具上产生的微裂纹数量、脱落颗粒数量、X和Y方向平均切削力以及刀具磨损量随着刀具前角变化的关系如图4所示。由图4a、图4b可知,刀具上产生的微裂纹数量和脱落颗粒数量随刀具前角的增加先减小后增大。由图4c可知,刀具X方向和Y方向的平均切削力随着刀具前角的增加先减小后增大。当刀具前角为 -6° 时,刀具X、Y方向的平均切削力达到最小。由图4d可知,随着刀具前角的增大,刀具磨损量先减小后增大。这是因为在相同外载荷条件下,当刀具前角增大时,前刀面压力变小,塑性变形、摩擦阻力、切削热量也会相应减小,会降低刀具磨损;但前角过大会使刃口受到的弯曲应力过大,从而导致崩刃。由图4a、图4b和图4d可知,当刀具前角为 -6° 时,刀具的微裂纹数、脱落颗粒数和磨损量最小。

3.4 不同刀具材料的影响

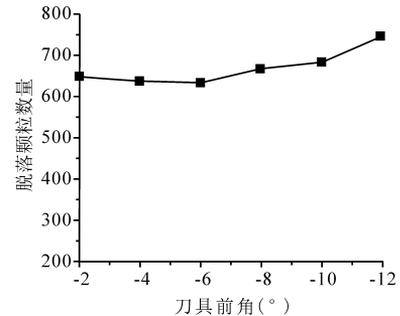
从图5可知,三种陶瓷刀具的微裂纹数量、脱落颗粒数量以及切削力随着循环步数的增加逐渐增加。

循环步数为0到 1.5×10^6 阶段时,刀具上微裂纹的数量和脱落颗粒数量急剧上升,这相当于刀具磨损的初期磨损阶段,刀具发生严重磨损;随后微裂纹和脱落颗粒数量增长比较缓慢,进入稳定磨损阶段。

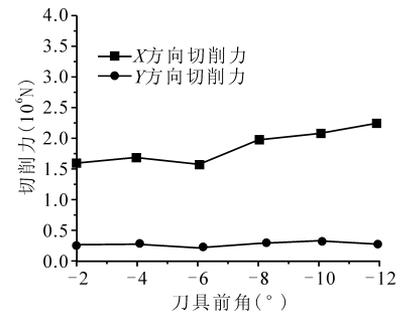
对比三种陶瓷刀具的模拟结果发现,当循环步数相同(切削相同距离)时,氧化铝SiC陶瓷刀具的微裂纹数、脱落颗粒数小于氧化铝TiC陶瓷刀具,氧化铝陶瓷刀具的微裂纹数和脱落颗粒数最大,说明随着断裂韧性和刀具硬度的增大,刀具的磨损量逐渐减小,刀具的耐磨性越好,与理论分析相符。



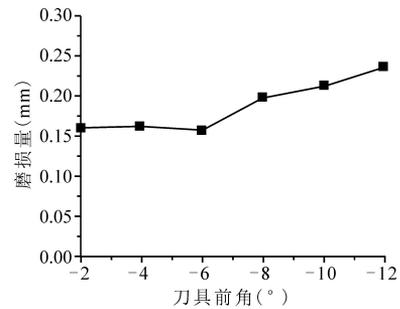
(a) 微裂纹数随刀具前角变化曲线



(b) 脱落颗粒数随刀具前角变化曲线

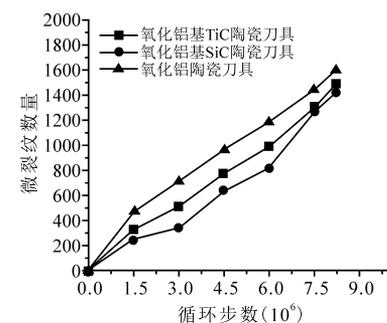


(c) 切削力随刀具前角变化曲线



(d) 磨损量随刀具前角变化曲线

图4 不同刀具前角模拟曲线



(a) 微裂纹数随循环步数变化曲线

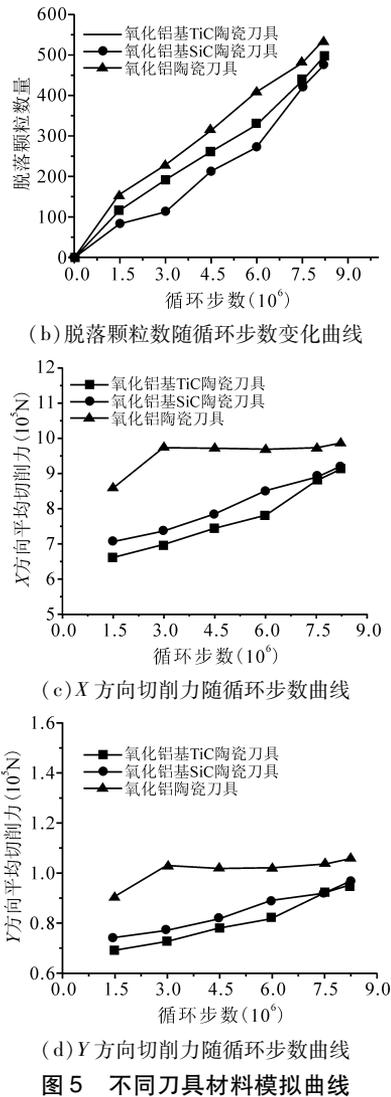


图5 不同刀具材料模拟曲线

4 结语

基于离散元切削模型,采用单因素实验法,通过监测裂纹数目、脱落颗粒、磨损量和切削力的变化情况,分析了切削速度、切削深度、刀具前角和不同氧化铝基陶瓷材料对刀具磨损的影响,得出以下结论:

(1) 刀具的前刀面靠近刀尖处先产生微裂纹,切削距离的增加使刀具不断有新的裂纹产生,并且前刀面裂纹逐渐向刀具内部扩展。当前刀面裂纹逐渐扩展到后刀面时,刀具材料的颗粒剥落,造成刀具磨损。

(2) 随着切削速度的增加,微裂纹数、脱落颗粒数以及刀具的磨损量先增大后减小,最后急剧上升;在一定的切削速度的范围内,微裂纹数、脱落颗粒数和刀具的磨损量随着切削速度的增加不断减小;在切削速度较低时,刀具磨损量较小,考虑到切削速度低时加工效率低,可以适当选择较高的切削速度。

(3) 随着切削深度的增加,平均切削力在不断增大,刀具的磨损量增大,故在切削加工时应尽量选

取合适的切削深度以减少刀具磨损。

(4) 刀具产生的微裂纹数、脱落颗粒数和刀具磨损量随着刀具前角的增加先减小后增大;当刀具前角为 -6° 时,刀面上产生的微裂纹数和脱落颗粒数最少;随着刀具前角的不断增大,工件切削表面的质量不断降低;刀具前角为 -6° 时可获得较好工件加工质量。

(5) 三种陶瓷刀具的微裂纹数、脱落颗粒数以及切削力随着循环步数的增加逐渐增加。随着断裂韧性和刀具硬度的增大,刀具的磨损量逐渐减小,刀具的耐磨性越好,与理论分析相符。

参考文献

- [1] 周咏辉. Al_2O_3 基纳米复合陶瓷刀具材料的研制及切削性能研究[D]. 济南:山东大学,2009.
- [2] 艾兴,邓建军. 陶瓷刀具的发展及其应用[J]. 机械工人(冷加工),2000(9):4-6.
- [3] 徐亮. 原位一体化制备棒晶增韧陶瓷刀具及其磨损可靠性研究[D]. 济南:山东大学,2013.
- [4] S K Bhattacharyya, A Jawaid, M H Lewis, et al. Wear mechanisms of sialon ceramic tools when machining nickel-based materials [J]. Wear, 1983(10):482-489.
- [5] G Brandt, A Gerendas, M Mikus. Wear mechanisms of ceramic cutting tools when machining ferrous and non-ferrous alloys [J]. Journal of the European Ceramic Society, 1990, 6(5):273-290.
- [6] 程欢欢. 不锈钢铣削加工刀具磨损有限元分析与刀具寿命预测[D]. 大连:大连理工大学,2012.
- [7] Lorentzon J, Jarvstrat N. Model ling tool wear in cemented-carbide machining alloy 718[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(10):1072-1080.
- [8] 姜胜强. 预压应力下陶瓷材料的裂纹扩展及其加工机理研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2012.
- [9] 张成. 基于离散元法及实验的预应力切削刀具磨损研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2013.
- [10] Itasca Consulting Group Inc. Pfc2D, Version3[C]. 10, Minneapolis, Minnesota, 2002.

第一作者:赵百强,硕士研究生,河北工业大学机械工程系,300132 天津市

First Author: Zhao Baiqiang, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China

通信作者:谷美林,副教授,河北工业大学机械工程系,300132 天津市

Corresponding Author: Gu Meilin, Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China