DOI: 10.3901/JME.2019.13.205

碳化硅陶瓷超声振动辅助磨削材料去除特性研究*

曹建国^{1,2} 张勤俭^{1,2}

(1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京 100044;
2. 北京交通大学载运工具先进制造与测控技术教育部重点实验室 北京 100044)

摘要: 为揭示碳化硅陶瓷超声振动辅助磨削材料去除特性,开展了光滑粒子流体动力学(SPH)单颗金刚石磨粒划擦仿真模拟,同时构建了超声振动划擦试验台,进行了单点金刚石超声振动划擦试验研究。结果发现:超声振动划擦中,材料去除根据切深的不同分为断续切削模式及连续切削模式;无超声作用划擦中的材料仅存在连续切削去除模式;超声振动作用的碳化硅陶瓷延性-脆性转移深度大于无超声作用下的延性-脆性转移深度。此外,通过碳化硅陶瓷超声内圆磨削试验结果同样发现超声振动作用下的延性-脆性转移深度变大,说明超声振动辅助磨削更容易实现延性域磨削。

关键词: 超声振动; 磨削; 碳化硅陶瓷; 材料去除

中图分类号: TG156

Material Removal Behavior in Ultrasonic Assisted Grinding of SiC Ceramics

CAO Jianguo^{1,2} ZHANG Qinjian^{1,2}

(1. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044;
2. Key Laboratory of Vehicle Advanced Manufacturing, Measuring and Control Technology, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: In order to investigate the material removal behavior in ultrasonic assisted grinding of SiC ceramics, simulation of the ultrasonic-assisted scratching using the smooth particle hydrodynamics (SPH) are operated. Meanwhile, the ultrasonic-assisted scratching tests are operated on the constructed ultrasonic assisted scratching (UAS) unit for comparison. The results show that there are two scratching modes in the UAS process: An intermittent mode and a continuous mode. The critical depth of cut in UAS is deeper than that in conventional scratching and ultrasonic assisted internal grinding of SiC ceramics. This study confirmed that ultrasonic assisted grinding can easily achieve the ductile grinding.

Key words: ultrasonic vibration; grinding; SiC ceramics; material removal

0 前言

随着光机电领域的技术进步,各种扫描仪、投影机、数码相机等新产品对光学透镜的需求量巨大。特别是近几年智能手机的蓬勃发展,对小型光学镜头的需求量也越来越大。现在,一般采用热冲击的方法来制造小型光学镜头^[1]。用于热冲击的模具要求具有耐高温、耐反复冲击的特性,碳化硅陶瓷具有优异的耐高温、良好的化学稳定性等物化特性,所以碳化硅陶瓷适宜于制造小型光学镜头所用的模具。但和其他的半导体材料材料特性类似,碳化

硅单晶也是典型的硬脆材料,具有材料硬度高、断裂韧性低及化学稳定性高等特性^[2]。迄今为止,碳化硅陶瓷的精密加工一般采用金刚石砂轮磨削的方法,但传统的砂轮磨削中不可避免地产生宏/微观裂纹、表面变质层与残余应力等加工损伤,需要长时间的后续光整加工去除表面缺陷,增加了加工成本,降低了加工效率^[3]。

超声磨削是一种复合特种加工技术,复合了传统超声加工和普通磨削加工的材料去除方式,具有提高材料去除率、减小磨削力、提高加工精度和表面完整性等优点,特别是在硬脆材料精密加工中具有显著优势^[4-5]。但目前对硬脆材料超声磨削材料去除机理的研究多采用试验的方法探索加工过程参量对材料去除结果的影响规律方面,然而对于超声振

* 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(M17RC00020)。20180716收到初稿,20190225收到修改稿。

动对材料去除过程影响规律的研究较少, 阐明磨削过程的材料去除特性对实现其高效精密加工有重要的意义。单点磨粒划擦试验能够直观地观察到划擦过程中磨粒与材料相互作用的结果, 将超声振动施加到划擦过程可有效揭示超声振动对于材料去除的影响过程, 进而明确硬脆材料超声磨削的材料去除机理。郑非非等^[6]通过超声划擦试验发现对加入超声作用后划擦力有显著下降, 压头的磨损量随振幅的增大, 有增大的趋势。曾亿江^[7]开展了预压应力下工程陶瓷超声振动压痕和划痕试验, 结果发现: 预压应力下工程陶瓷超声振动加工能有效地增大材料的去除率, 减小切削力, 同时抑制了加工过程中表面/亚表面裂纹的扩展, 从而减少了加工损伤, 改善了材料的表面质量, 实现了工程陶瓷的高效、低损伤加工。PENG 等^[8]研究了硬脆材料超声划擦过程中工具的磨损研究, 发现了施加超声振动可以有效降低工具的磨损。

本文为揭示碳化硅陶瓷超声振动辅助磨削材料去除特性, 开展了单点金刚石超声振动划擦试验及光滑粒子流体动力学(Smooth particle hydrodynamics, SPH)单颗金刚石磨粒划擦仿真模拟, 同时开展了无超声情况下的单点金刚石划擦及仿真进行对比。SPH 法是一种纯拉格朗日无网格算法, 克服了有限元法中由于网格划分法而产生大变形畸变的问题, 能够很好地模拟硬脆材料在去除过程的行为特征^[9-10]。本文通过试验及仿真的方式研究超声振动作用下材料去除过程的切削模式、延性-脆性转移特性及材料去除过程。同时, 为验证划擦试验的结果, 开展碳化硅陶瓷超声内圆磨削试验。

1 试验原理、装置及仿真模型

1.1 超声振动辅助磨削加工原理

超声振动辅助磨削的加工原理如图 1 所示, 在加工过程中频率 f 、振幅 A_a 的超声振动施加于砂轮的轴向。但是由于 L (轴向)- R (径向)的耦合作用, 在砂轮的半径方向同时会产生频率 f 、振幅 A_r 的超声

图 1 超声振动辅助磨削加工原理

振动, 而振幅 A_r 显著小于振幅 A_a 。磨削过程中, 砂轮的磨削深度为 a_e , 工作台以速度 v_w 做进给运动, 同时砂轮以旋转速度 n_g 旋转。在砂轮与工作相对运动及超声振动的联合作用下, 磨粒相对于工件会产生空间螺旋状的运动轨迹(图 1b)。

1.2 超声单点划擦仿真模型

仿真模型如图 2 所示, 工件由 SPH 粒子构成, 磨粒通过有限元网格划分构成, 工件和磨粒的材料本构模型如表 1 所示, 具体参数参考了手册^[11]及文献^[12]。为了研究材料在不同切深情况下的材料去除行为特征, 设定切深为 $0.07 \mu\text{m}$ 及 $2 \mu\text{m}$, 在材料去除过程超声振动施加于 y 和 z 方向, 振幅为 $A_y=0.25 \mu\text{m}_{p.p}$ 和 $A_z=1.2 \mu\text{m}_{p.p}$, 频率 $f=14.3 \text{ kHz}$, 磨粒在 x 方向的切削速度为 $V_s=0.5 \text{ m/s}$ 。工件下表面为全约束状态。同时, 为了全面了解超声振动对于材料去除行为的影响机制, 开展了同等条件下没有超声振动作用的划擦试验, 以进行比较。划擦开始时实际切深在有/无超声振动时均相同。

图 2 仿真模拟模型示意图

表 1 仿真模拟所用的本构模型

	单点金刚石	碳化硅陶瓷
状态方程式	线性型	多项式型
本构方程	Rigid	Johnson-Holmquist

1.3 超声单点划擦试验

为了验证仿真模拟的结果, 并进一步揭示超声振动对于材料去除特性的影响, 本文开展了超声振动划擦(Ultrasonic vibration scratch, UAS), 试验方法如图 3 所示。试验过程中, 使用单点金刚石磨粒的金刚石部分, 金刚石的形状与仿真模拟过程中使用的金刚石形状一致。与图 1 所示的超声振动磨削过程中超声振动的行为相类似, 超声划擦试验同样在 y 和 z 方向施加超声振动, 分别用 A_y 和 A_z 表示。使用的碳化硅工件为圆形, 并有一定的倾角 α 。如图 3 所示, 磨粒在 L - R 方向以一定的速度 V_s 进行划擦, 磨粒的切削深度会从 0 开始逐渐加深, 从而达到揭示材料在不同切深情况下的材料去除行为的目的。同时, 也开展了无超声振动作用下的划擦试验(Scratch test, CS), 与超声振动作用下的材料去除行为进行比较。

图7 CS和UAS工件断面材料变形情况(x-y断面)

除模式。这是由于超声振动作用下,在磨粒半径方向(仿真模拟中为 y 方向)的振幅超过切深所致。UAS中划痕的间隔为 $35\ \mu\text{m}$,这和超声振动的空间螺旋运动的轨迹相一致。如图6c和6d所示,在切深增加至 $a_e=2\ \mu\text{m}$ 时,CS与UAS仿真试验中均出现材料变形去除变大的现象,这是由于磨粒和工件接触区域变大的缘故。在划擦过程中,磨粒和工件的接触宽度为 $15\ \mu\text{m}$,CS仿真试验中在划痕宽度方向上的变形区域最大为 $8.2\ \mu\text{m}$,UAS最大为 $18.5\ \mu\text{m}$,材料的去除与变形区域因超声振动的作用而变大,这可能归结为由于超声振动引起的冲击作用。

为了充分揭示UAS过程中材料的去除机制,观察了材料在划痕深度方向的变形及去除行为。切深 $a_e=0.07\ \mu\text{m}$ 和 $a_e=2\ \mu\text{m}$ 时CS和UAS在划痕深度方向的材料去除行为如图7所示。如图7a和7b,与划痕宽度方向类似,在切深 $a_e=0.07\ \mu\text{m}$ 时CS为连续切削模式,而UAS为断续切削模式。CS与UAS深度方向均出现因磨粒的耕犁作用而使材料变形的现象,CS变形深度为 $3.3\ \mu\text{m}$,UAS为 $4.7\ \mu\text{m}$ 。当切

深增大到 $a_e=2\ \mu\text{m}$ 时,如图7c和7d所示,CS与UAS中工件的变形及材料破坏区域均变大,CS材料破坏最大深度为 $22.25\ \mu\text{m}$,UAS最大为 $29.5\ \mu\text{m}$ 。CS划痕深度方向变形及材料破坏区域变深的原因可以归结为随着切深的变深,磨粒由耕犁作用变为切削作用,从而导致材料的压应力和剪切应力变大,最终导致材料产生破坏。对比CS与UAS,由于超声振动磨粒在划痕深度方向超声冲击作用,导致材料变形及破坏深度变深。再者,在材料去除过程,由于磨粒负前角的影响,在磨粒的前进方向材料同样产生破坏作用。同样对比CS与UAS,CS和UAS磨粒前方材料破坏的距离分别为 $5.0\ \mu\text{m}$ 和 $8.5\ \mu\text{m}$ 。所以,在超声磨削中由于超声振动引起的冲击作用会使磨粒前行方向及磨粒切深方向的材料变形及破坏范围变大,导致在硬脆材料加工中材料加工效率的提高。但把超声振动施加到工件的深度方向会导致加工精度降低。

2.2 划擦试验结果

划擦试验形成的划痕3D-SEM形貌图如图8所示。

图8 划痕3D-SEM图像

材料在延性域去除过程中几乎无脆性破坏的产生,形成的划痕较为光滑。与此相对的是,材料在脆性域去除过程中会发生脆性破坏,划痕为脆性破坏形态。如图8a和8b所示,CS试验中当切深 a_e 较小时,划痕连续较为光滑无脆性破坏,但随着切

深的进一步加深,在划痕的侧面及底面开始出现脆性破坏,材料去除进入脆性域,这里将划痕由光滑状态即将进入脆性破坏的深度定义为延性-脆性转移点。

有超声振动作用的UAS试验中,当切深 a_e 较

小时，材料为延性域断续去除，但随着切深的加深，材料去除模式由断续模式变为连续模式(图 8d 和 8e)。如图 8c 和 8f 所示，当切深增大到一定程度之后，无论有无超声振动的作用，材料均以脆性破坏的形态去除。在 a_{UAS} 区域断续划痕之间的间距为 $35\text{ }\mu\text{m}$ ，当沟槽深度增大到 $2\text{ }\mu\text{m}$ 左右时，CS 试验形成的沟槽宽度为 $41.2\text{ }\mu\text{m}$ ，UAS 为 $52\text{ }\mu\text{m}$ ，这些和仿真模拟的结果基本一致。图 9 为利用 3D-SEM 测量 b_{CS} 和 b_{UAS} 区域脆性破坏发生点的划痕的深度(即延性-脆性转移点深度)的结果，CS 试验的延性-脆性转移点深度为 $0.08\text{ }\mu\text{m}$ ，而 UAS 为 $0.125\text{ }\mu\text{m}$ 。施加超声振动后，碳化硅陶瓷的延性-脆性转移点变深。

图 9 延性-脆性转移点(区域 b_{CS} 和区域 b_{UAS})

单磨粒切削过程硬脆材料发生脆性破坏的原理如图 10 所示，切削过程磨粒法向力 f_n 和中位裂纹 C_m 的关系如下式^[13]

$$C_m = \left(\frac{4\chi f_n}{K_{IC}} \right)^{2/3} \quad (1)$$

式中， K_{IC} 为材料断裂韧性； χ 是与磨粒前端角度有关的修正系数。

图 10 硬脆材料断裂示意图

横向裂纹 C_l 和中位裂纹 C_m 有如下的关系^[14]

$$C_l \cong \frac{C_m}{7} \quad (2)$$

在切削过程中，当横向裂纹生成，意味着材料去除由延性域转变为脆性域。在磨削过程中，磨粒的切削深度越大，产生的切削力(包含法向力和切向力)越大。此外有研究发现：在同样的切削深度下，超声振动作用下的磨粒的法向力明显小于无超声振

动作用磨粒的法向力^[15-16]。根据式(1)和式(2)，这意味着在 UAS 中磨粒的切深只有大于 CS 中的切深，才能形成使材料产生横向裂纹的相同大小的力。由此，在 UAS 中延性-脆性转移点深度大于 CS 中延性-脆性转移点深度。

以上的试验结果和仿真模拟结果几乎一致，也说明使用 SPH 模拟超声振动下的材料去除过程是可行的。

2.3 碳化硅陶瓷超声磨削试验

基于以上的仿真模拟和试验结果，本文开展了超声内圆磨削试验。如图 11 所示。在内圆磨床(冈本 GRIND-X IGM15EX)上构建了超声辅助内圆磨削装置。试验过程中工件以 n_w 旋转的同时，超声振动(频率 f ，振幅 A)施加在砂轮(旋转速度 n_g)的轴向，在砂轮的径向施加进给速度 V_c ，从而实现超声内圆磨削。为了改善内圆面的加工质量，砂轮在进行磨削的同时也在工件的轴向进行往复运动。超声振动系统采用岳将公司制造的 URT40 超声发生装置，为了记录磨削过程的磨削力的变化在超声主轴的下方放置了三向测力仪。超声主轴上装有直径为 6 mm 的砂轮，使用的碳化硅陶瓷工件内径 12 mm 、外径 22 mm ，长 13 mm 。试验过程冷却液为 60 倍稀释乳化液，磨削后工件内面的表面完整性通过扫描电镜(ELIONIX 公司 ERA-8900)观察。试验条件如表 3 所示。

图 11 超声内圆磨削试验装置

表 3 内圆磨削试验条件

超声振动	频率 f/kHz	40
	振幅 $A(\text{p-p})/\mu\text{m}$	0, 8.0
	SD1000P100M 6 mm(直径)×5 mm(长度)	
	往复运动距离/ mm	8
砂轮	往复运动速度/ (m/min)	0.1
	旋转速度 $n_g/(\text{r}/\text{min})$	3 000, 4 000
	进给速度 $V_c/(\mu\text{m}/\text{min})$	10
	碳化硅陶瓷, 12mm(内径)×22mm(外径)×13 mm(长度)	
工件	磨削量/ μm	25
	旋转速度 $n_w/(\text{r}/\text{min})$	300 r/min
	冷却液	60 倍稀释乳化液

在磨削过程中相对于工件单颗磨粒的最大切削深度 g_m 可以有下式表示^[17]。

$$g_m = 2a \frac{V_w}{V_g} \sqrt{\frac{\Delta}{D_e}} \quad (3)$$

式中, V_w 为工件的线速度; V_g 为砂轮的线速度; Δ 为砂轮的半径切削量; D_e 为砂轮的当量直径; a 为连续切削刃间隔, 可以通过查询相关标准计算。

图 12 磨削后工件 SEM 形貌图

在 $g_m = 0.069 \mu\text{m}$ 时, 普通内圆磨削生成的工件表面可以观察到局部呈现脆性破坏, 同时也可以看到延性面。与之相对的是, 在超声辅助内圆磨削生成的表面几乎看不到脆性破坏。这表明此时普通的内圆磨削的磨削模式为延性-脆性混合域磨削, 而超声辅助内圆磨削的磨削模式为延性域磨削。在 $g_m = 0.093 \mu\text{m}$ 时, 普通内圆磨削生成的工件表面几乎都为脆性破坏形成的表面, 而超声辅助内圆磨削生成的表面只在局部可以看到脆性破坏形成的表面。这表明此时普通的内圆磨削的磨削模式为脆性域磨削, 而超声辅助内圆磨削的磨削模式为延性-脆性混合域磨削。

以上的结果表明: 碳化硅陶瓷普通内圆磨削 $g_m = 0.069 \mu\text{m}$ 时, 出现延性向脆性转移的现象。而在碳化硅陶瓷超声辅助内圆磨削当 $g_m = 0.093 \mu\text{m}$ 才出现延性向脆性转移的现象, 说明碳化硅陶瓷超声辅助内圆磨削相对于普通内圆磨削更容易实现延性域磨削。磨削试验结果和划擦试验结果相符合。

3 结论

(1) 超声振动作用下的材料去除根据切深的大小不同存在两种模式: 断续切削及连续切削。在材料去除过程, 因超声振动引起的冲击作用会导致划痕深度及磨粒前进材料去除量增加。

(2) 无超声作用划擦试验中碳化硅陶瓷延性-脆性转移点深度为 $0.08 \mu\text{m}$, 而超声振动划擦试验碳化硅陶瓷延性-脆性转移点深度为 $0.125 \mu\text{m}$, 施加超声振动后, 碳化硅陶瓷的延性-脆性转移点变深。

(3) 碳化硅陶瓷超声辅助内圆磨削延性-脆性转移点明显大于普通内圆磨削的延性-脆性转移点, 说

明碳化硅陶瓷超声辅助内圆磨削相对于普通内圆磨削更容易实现延性域磨削。

参 考 文 献

- [1] HALL C, TRICARD M, MURAKOSHI H, et al. New mold manufacturing techniques[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2005, 5868: 58680V.
- [2] LEE S J, BAEK S S, KANG E S, et al. SiC Ceramics[J]. Rev. Adv. Mater. Sci., 2011, 28: 21-25.
- [3] AGARWAL S, RAO P V. Experimental investigation of surface/subsurface damage formation and material removal mechanisms in SiC grinding[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48(6): 698-710.
- [4] SPUR G, HOLL S E. Ultrasonic assisted grinding of ceramics [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 62(4): 287-293.
- [5] 张建华, 田富强, 张明路, 等. 微磨削与超声振动复合加工技术研究现状与展望[J]. 振动与冲击, 2016, 35(8): 97-109.
ZHANG Jianhua, TIAN Fuqiang, ZHANG Minglu, et al. Review of studies on micro-grinding and ultrasonic assisted machining[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(8): 97-109.
- [6] 郑非非, 张嘉桐, 董志刚, 等. 超声振动对单颗金刚石工具划擦 RB-SiC 的材料去除行为的影响[C]// 2016 年全国超声加工技术研讨会论文集, 大连, 2016.
ZHENG Feifei, ZHANG Jiatong, DONG Zhigang, et al. Influence of the ultrasonic vibration on the material removal rate in RB-SiC scratching test with a single diamond tool[C]// Proceedings of the 2016 National Ultrasonic Processing Technology Symposium,

- Dalian, 2016.
- [7] 曾亿江. 预压应力下工程陶瓷超声振动压痕和划痕试验研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2016.
- ZENG Yijiang. Experimental study of ultrasonic-assisted indentation and scratching of engineering ceramics at compressive pre-stressing[D]. Xiangtan : Xiangtan University, 2016.
- [8] PENG Y, LIANG Z, WU Y, et al. Effect of vibration on surface and tool wear in ultrasonic vibration-assisted scratching of brittle materials[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59(1-4): 67-72.
- [9] GINGOLD R A, MONAGHAN J J. Smoothed particle hydrodynamics: Theory and application to non-spherical stars[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1977, 181(3): 375-389.
- [10] RÜTTIMANN N, ROETHLIN M, BUHL S, et al. Simulation of hexa-octahedral diamond grain cutting tests using the SPH method [J]. Procedia CIRP, 2013, 8: 322-327.
- [11] ARIF M, RAHMAN M, SAN W Y. Analytical model to determine the critical feed per edge for ductile-brittle transition in milling process of brittle materials[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51(3): 170-181.
- [12] BIFANO T G, FAWCETT S C. Specific grinding energy as an in-process control variable for ductile-regime grinding[J]. Precision Engineering, 1991, 13(4): 256-262.
- [13] 何玉辉, 周群, 郎献军. 轴向超声振动辅助磨削的磨削力研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(4): 170-176.
- HE Yuhui, ZHOU Qun, LANG Xianjun. Study on grinding force of axial ultrasonic vibration assisted grinding[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(4): 170-176.
- [14] 肖行志, 郑侃, 廖文和. 超声振动辅助磨削牙科氧化锆陶瓷切削力预测模型研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(12): 140-145.
- XIAO Xingzhi, ZHENG Kan, LIAO Wenhe. Research on prediction model of cutting force in ultrasonic vibration assisted grinding of zirconia ceramics[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(12): 140-145.

作者简介: 曹建国, 男, 1983 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为硬脆材料超精密加工。

E-mail: jgciao@bjtu.edu.cn