

文章编号 1004-924X(2015)08-2229-07

碳化硅陶瓷的超声振动辅助磨削

刘立飞, 张飞虎*, 刘民慧

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:采用普通磨削方式和超声振动辅助磨削方式对无压烧结 SiC 材料进行了磨削工艺实验, 对不同磨削方式下磨削参数对磨削力比、表面损伤及亚表面损伤的影响进行了对比研究, 并分析了超声振动磨削作用机制。实验结果显示, 该实验中 SiC 材料去除主要以脆性去除为主, 砂轮磨削力比随着磨削深度和进给速度的增加缓慢增加, 随着主轴转速的增加略有减小; 普通磨削时 SiC 工件亚表面损伤深度随着磨削深度、进给速度增加逐渐增加, 而超声振动辅助磨削变化较小。与普通磨削相比, 在相同的磨削参数下, 超声振动辅助磨削的高频冲击使材料破碎断裂情况得到改善, 且磨削力比减小近 1/3, 表面裂纹、SiC 晶粒脱落、剥落等表面损伤较少, 表面损伤层较浅, 亚表面裂纹数量及深度都有较大程度降低, 可以获得较为理想的表面质量。

关键词:碳化硅陶瓷; 超声振动辅助磨削; 磨削力比; 表面损伤; 亚表面裂纹

中图分类号: TN305. 2; TN304. 24 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3788/OPE. 20152308. 2229

Ultrasonic assisted grinding for silicon carbide

LIU Li-fei, ZHANG Fei-hu*, LIU Min-hui

(College of Mechatronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: zhangfh@hit.edu.cn

Abstract: A grinding experiment was performed for silicon carbide (SiC) materials by Ultrasonic Assisted Grinding (UAG) and Normal Grinding (CG) methods. The effects of grinding parameters in different modes on the grinding force ratio, surface damage and sub-surface damage of the SiC materials were researched by using a dynamometer and a Scanning Electron Microscopy (SEM). Then the action mechanism of the UAG was researched. The experimental results show that brittle fracture is the main removal mode in grinding process. The grinding force ratio of the grinding wheel increases with the increases of cutting depth and feed rates slowly and decreases with the increase of spindle speed slightly. In the normal grinding, the sub-surface damage depth of a SiC workpiece increases with the increase of cutting depth and feed rates gradually, and that in the UAG has a smaller change. Under the same grinding parameters, the grinding force ratio in UAG process is reduced nearly 1/3 as compared with the results in CG process, and its surface damages, such as surface cracks, fall off of SiC grains, flaking of SiC are reduced and the thickness of surface damage layer is thinned. In addition, the density and depths of sub-surface cracks are reduced in a greater degree. It concludes that the UAG method can obtain ideal surface quality and high processing efficiency.

收稿日期: 2014-12-20; **修订日期:** 2015-01-15.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2011CB013202); 国家自然科学基金资助项目 (No. 51175126)

Key words: silicon carbide ceramics; ultrasonic assisted grinding; grinding force ratio; surface damage; sub-surface crack

1 引言

随着空间科学技术的发展,空间光学元件对精度和成像质量的要求越来越高,因此对材料的性能指标要求越来越严苛,如低密度、高比刚度、高硬度、小的热膨胀系数等。与传统光学材料相比,SiC 具有优良的材料性能(硬度高、热导率大、热膨胀系数小、耐化学腐蚀等),可满足空间光学元件的要求,已成为制造大口径、轻量化光学元件的理想材料^[1-3]。由于 SiC 材料硬度高、脆性大,因此磨削加工是其主要加工手段,但普通磨削方法加工 SiC 陶瓷困难较大,不仅加工效率低,磨削加工过程中还会由于脆性断裂导致表面和亚表面损伤严重,为后续研磨抛光造成较大负荷,在大口径 SiC 反射镜制造过程中严重制约其加工周期。另外,磨削过程中金刚石砂轮损伤严重,其影响甚至超过加工机床精度对面形误差的影响。在精密超精密非球面加工过程中,这些问题严重制约大型 SiC 材料光学元件的形状精度和最终加工效率^[4-6]。因此通过开发新技术、研制新型设备以及优化加工参数等方式提高 SiC 陶瓷的加工效率和加工质量成为研究人员努力的方向,并取得了相应的成果^[7,8]。超声振动辅助金刚石磨削将超声振动引入到磨削过程中,使砂轮在磨削的同时做高频脉冲振动,这种新型磨削加工技术对于提高磨削效率、改善磨削质量以及缓解砂轮磨损等具有良好的作用^[9,10]。国内外学者研究了超声振动辅助磨削手段对硬脆材料加工质量和加工效率的影响,并取得了较好的成果^[11-13]。不过,这些研究目前大多集中在超声振动辅助磨削在玻璃等普通脆性材料磨削的表面粗糙度、磨削材料去除率等方面,对于具有高硬度高脆性的 SiC 材料的相关研究及超声振动作用机制研究较少。

本文利用 DMG Ultrasonic70-5 超声加工中心对 SiC 陶瓷分别进行了金刚石砂轮普通磨削和超声振动辅助磨削,研究了不同磨削工艺参数对磨削力比及表面/亚表面损伤的影响,并对两种磨削方式下的磨削力比、表面/亚表面损伤形式及深度进行了实验对比,分析了超声振动辅助作用机

制,对于优化磨削参数,改善磨削质量具有指导意义。

2 实验准备

2.1 SiC 材料及磨削设备

SiC 材料为上海硅酸盐研究所提供的无压烧结 SiC 陶瓷,其抛光表面如图 1 所示,根据能谱分析,陶瓷中浅色部分为 SiC 陶瓷,深色部分为石墨。

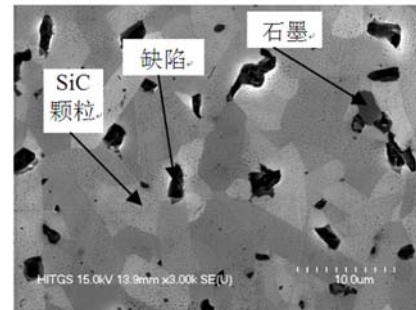


图 1 SiC 陶瓷抛光表面

Fig. 1 Polished surface of SiC ceramics

使用 DMG Ultrasonic 70-5 超声加工中心作为实验设备,超声振动频率为 25.9 kHz。金刚石砂轮为中空式,磨粒直径约为 76 μm ,砂轮外圆直径为 10 mm,壁厚为 1 mm,超声振动附加在金刚石砂轮上,方向为沿砂轮轴线平行于工件加工表面,如图 2 所示,使用砂轮外圆进行磨削。

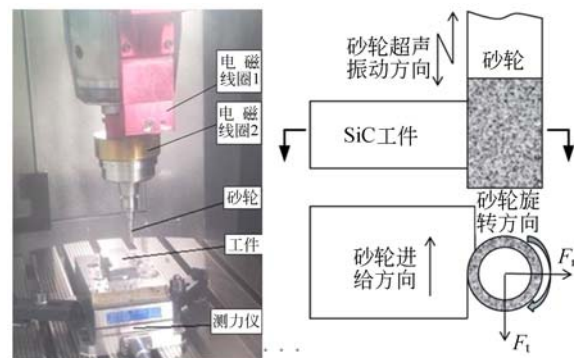


图 2 实验设备及超声振动示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of ultrasonic assisted grinding and experimental equipment

2.2 检测方法

使用 Kistler Dynamometer 六维测力仪测量磨削力,扫描电子显微镜(SEM)观察表面形貌。

亚表面损伤试件的制备过程为:使用离子束抛光仪进行工件亚表面损伤及亚表面裂纹深度检测前的预处理,结合 SEM 进行检测,如图 3 所示。在工件垂直与磨削表面和磨削方向的侧边使用离子束沿磨削方向去除材料,深度约 50 μm ,加工出如图 3(b)所示的截面,使用 SEM 对截面进行观察检测即可得到 SiC 陶瓷磨削亚表面损伤情况并根据相应标记尺度对亚表面深度进行检测。制备的 SiC 陶瓷亚表面损伤试件可以有效避免对工件表面的二次损伤,可真实表现 SiC 材料亚表面裂纹情况。

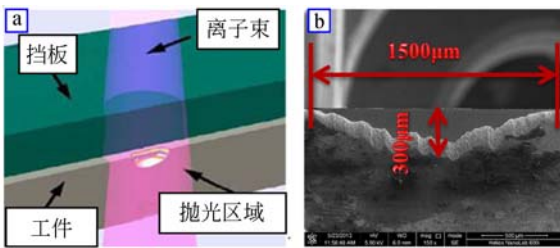


图 3 工件预处理方式示意图

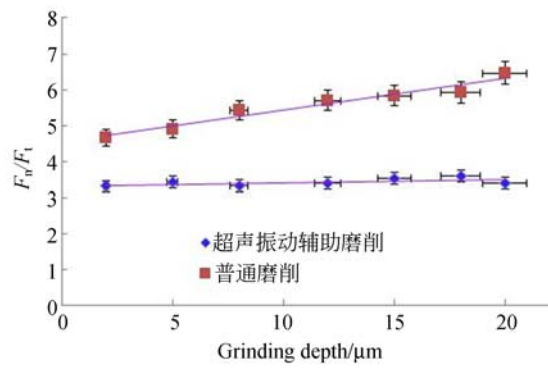
Fig. 3 Schematic diagrams of workpiece pretreatment

3 实验结果及分析

3.1 磨削力比 F_n/F_t

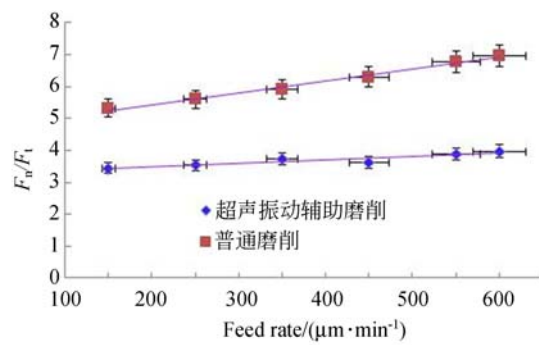
在大口径 SiC 陶瓷镜面磨削过程中,砂轮磨损严重,对磨削表面质量和精度具有非常重要的影响。因此,对 SiC 陶瓷在磨削过程中的砂轮磨损情况进行检测非常必要。在 SiC 陶瓷磨削时,随着磨削的进行,由于磨粒钝化而使砂轮产生磨损钝化,其法向磨削力会急剧增大,但切向磨削力增长较为缓慢。因此,当砂轮磨损严重时,磨削过程中的磨削力比会发生较大变化,可以通过法向磨削力和切向磨削力的磨削力比 F_n/F_t 来对砂轮磨损及钝化情况进行一定程度上的监测,以便能够及时对砂轮进行修整。

图 4 所示为砂轮在单因素影响下,磨削 30 min 后测得的磨削法向力与切向力的比值随磨削参数变化的线性趋势图,实验结果均是由 3 次测量求平均值所得。该拟合趋势图在检测结果 5% 的误差范围内。由趋势图可以看出,在普通磨削



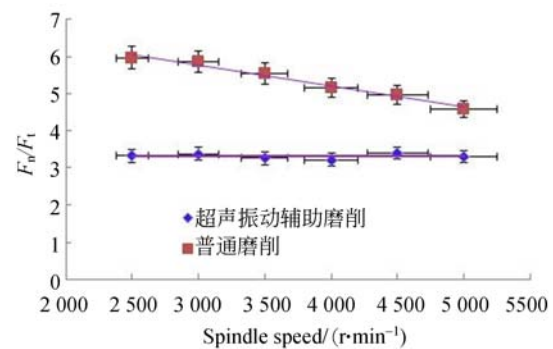
(a) 磨削深度影响

(a) Influence of grinding depth



(b) 进给速度影响

(b) Influence of feed rate



(c) 主轴转速影响

(c) Influence of spindle speed

图 4 砂轮磨削力比随着磨削参数变化曲线

Fig. 4 Influence of grinding parameters on grinding force rate

方式下,随着磨削深度和进给速度的增加,磨削力比呈现逐渐增大的趋势,随着主轴转速的增加,磨削力比逐渐减小,且变化较为明显,但超声振动辅助磨削方式下,磨削力比变化较为平缓,说明在该磨削方式下工件磨削状态较为稳定。同时,普通

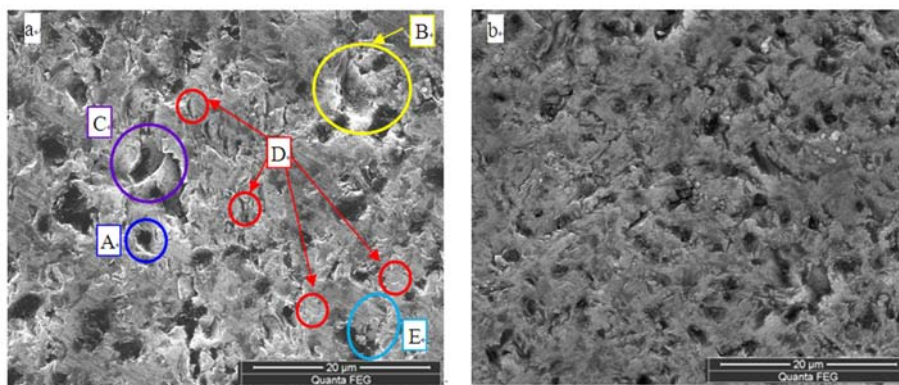
磨削的磨削力比大于超声辅助振动磨削,即超声振动的加入可以提高 SiC 陶瓷可磨削性,且能有效改善砂轮磨损情况。

3.2 表面形貌

利用扫描电子显微镜对两种磨削方式加工后的工件表面形貌进行了检测,检测结果如图 5 所示。图 5(a)所示为普通磨削条件下的表面形貌,根据 SEM 照片,可以看到普通磨削 SiC 工件表面具有较多较大的凹坑,其中有材料本身的气孔缺陷在磨削后露出(如图中标志 A 所示);轮廓及凹坑内较为粗糙的(如图中标志 B 所示),是在磨削时在磨削力作用下整个 SiC 晶粒从材料表面脱落形成的;轮廓及凹坑内部较为光滑的(如图中标志 C 所示),即为 SiC 晶粒产生裂纹并扩展、断裂继而剥落形成的凹坑;另外,在 SiC 工件表面存在许多表面裂纹(如图中标志 D 所示);表面一些磨削划痕为 SiC 材料中的碳相或硅相等较软部分以塑性去除方式所留,表面凹坑的存在使工件表面还

有一些磨屑黏附在工件表面(如图中标志 E 所示);工件表面某些地方存在一些磨粒磨削划痕。因此,普通磨削时 SiC 材料以脆性去除为主,脆性断裂情况较为严重,形成较差的表面形貌,且严重影响工件的功能和寿命。

图 5(b)所示为超声振动辅助磨削表面情况,从 SEM 照片可以看出,与普通磨削条件下的表面形貌相比,由于该磨削方式是普通磨削运动与超声振动两个运动的合成,形成类似局部研抛的表面,因此,表面很难看到明显的磨削划痕;超声振动辅助磨削表面凹坑较少,形状尺寸也较小,工件表面细小的 SiC 碎屑较多,这是因为砂轮高频振动和局部研抛现象导致 SiC 晶粒产生较多的细小破碎,这种细小破碎可以避免晶体颗粒整体脱落或者由于裂纹扩展剥落形成较大的表面凹坑,能够提高工件表面质量和材料去除率。因此,在超声振动辅助磨削过程中, SiC 材料产生大量微破碎是材料去除的主要手段。



(a) 普通磨削

(a) Normal grinding

(b) 超声振动辅助磨削

(b) Ultrasonic assisted grinding

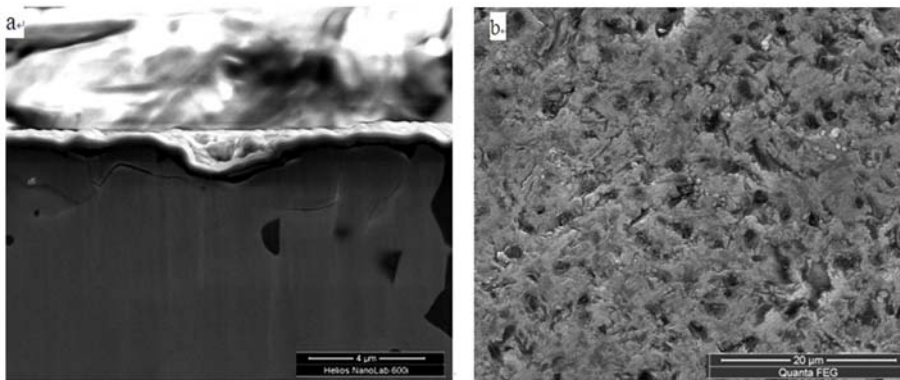
图 5 普通磨削和超声振动辅助磨削下表面损伤的 SEM 照片

Fig. 5 SEM pictures of surface damages in normal grinding and ultrasonic assisted grinding

3.3 亚表面裂纹

利用离子束抛光技术对工件磨削表面进行处理,得到垂直于磨削表面的截面,如图 6 所示,磨削参数为主轴转速 5 000 r/min,磨削深度 8 μm ,进给速度 150 mm/min。图 6(a)为普通磨削时的亚表面裂纹情况,可以观察到由于脆性断裂形成的中位裂纹、横向裂纹、斜裂纹及交叉裂纹等,图 6(b)所示为超声振动辅助磨削时的亚表面裂纹情况,可以观察到少量微破碎造成的微小裂纹和

较浅的斜裂纹。通过对比发现普通磨削下形成的亚表面裂纹较深,密度较大,交叉裂纹形成会对工件的使用性能造成较大隐患,对于精密光学元件,磨削完成后需要进行后续研磨抛光,普通磨削会造成后续阶段去除量较大,效率低。超声振动辅助磨削亚表面裂纹较浅且密度低,可以有效改善工件质量,减小后续研抛阶段工作量,提高加工效率。



(a) 普通磨削 (a) Normal grinding
(b) 超声振动辅助磨削 (b) Ultrasonic assisted grinding

图 6 普通磨削和超声振动辅助磨削时工件亚表面裂纹的 SEM 照片

Fig. 6 SEM pictures of sub-surface cracks in normal grinding and ultrasonic assisted grinding

图 7 所示为两种磨削方式下工件亚表面最大裂纹深度随着磨削进给速度变化曲线。在进给速度由 150 mm/min 增加到 550 mm/min 时,普通磨削工件亚表面最大裂纹深度呈现逐渐增加的趋势,而超声振动辅助磨削工件亚表面最大裂纹深度变化不明显,且最大裂纹深度较普通磨削有较大幅度的降低。因此,利用超声振动辅助磨削,在相同磨削参数下能够获得更高的表面/亚表面质量;在满足工件加工质量的情况下可以使用较大的磨削参数,提高加工效率。

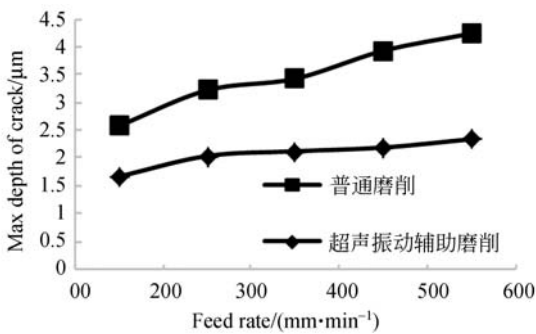


图 7 SiC 最大裂纹深度随进给速度变化曲线

Fig. 7 Influence of feed rate on max depth of sub-surface cracks

3.4 超声振动辅助磨削机制分析

根据上述实验结果可以看出,超声振动辅助磨削在砂轮外圆磨削时可以有效降低磨削力,改善磨削质量。

在超声振动辅助磨削过程中,砂轮垂直于进给方向进行高频振动,其振动位移为:

$$y = A \sin(2\pi ft + \varphi), \quad (1)$$

其中: f 为振动频率, A 为振幅。

则超声振动方向瞬时速度为:

$$v_u = y' = 2\pi f A \cos(2\pi ft + \varphi), \quad (2)$$

其瞬时加速度为:

$$a_u = -4\pi^2 f^2 A \sin(2\pi ft + \varphi). \quad (3)$$

实验中超声振动频率为 25.9 kHz, 振幅为 12 μm, 由超声振动产生的垂直于进给方向的最大瞬时速度和加速度分别为 1 952 m/s 和 3.18×10^8 m/s²。该瞬时加速度会使金刚石磨粒对工件表面产生较大的高频冲击力, 但该冲击力在沿砂轮轴向方向并产生高频变化, 因此并不会增大砂轮磨削力, 反而会使得工件表面材料产生大量微破碎, 有利于材料去除, 总体磨削力反而会减小。同时以大量微破碎代替工件大颗粒脆性断裂去除, 工件表面和亚表面损伤也会降低。

在超声振动辅助磨削过程中, 砂轮沿轴向做高频振动, 因此, 单颗磨粒的磨削轨迹是沿进给方向和沿超声振动方向的合成, 如图 8 所示。与普通磨削相比, 具有更大的切削速度, 即

$$v = v_w + v_u. \quad (4)$$

根据磨削力公式^[14], 砂轮线速度越大, 磨削力越小, 砂轮做超声振动会对 SiC 工件表面产生高频冲击, 且砂轮表面多磨粒的磨削轨迹相互交叉, 更有利于 SiC 材料表面/亚表面裂纹的扩展, 使工件材料破碎去除相对容易, 产生大量微破碎, 使磨削力降低, 表面及亚表面损伤程度及深度降低。

超声振动辅助磨削时较小的磨削力会降低砂

轮磨损,延长砂轮寿命;使黏附在砂轮表面的磨屑脱落,缓解砂轮堵塞,有效降低砂轮磨损。另外,在超声振动辅助下,高频振动会使砂轮“变软”,硬度降低^[15],有利于磨损磨粒脱落及提高表面/亚表面质量。

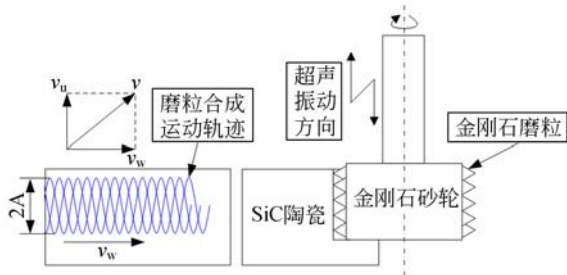


图 8 超声振动辅助磨削时砂轮磨粒运动轨迹

Fig. 8 Trajectory of grit in ultrasonic assisted grinding

参考文献:

- [1] 郝寅雷,赵文兴,翁志成. 新型反射镜材料——碳化硅[J]. 宇航材料工艺, 2001(4):11-14.
HAO Y L, ZHAO W X, WENG ZH CH. New mirror material of silicon carbide [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2001(4):11-14. (in Chinese)
- [2] NI J M, LI B Z. Phase transformation in high-speed cylindrical grinding of SiC and its effects on residual stresses [J]. *Materials Letters*, 2012,89:150-152.
- [3] 张剑寒,张宇民,韩杰才. 空间用碳化硅反射镜的设计制造与测试[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 179-184.
ZHANG J H, ZHANG Y M, HAN J C, et al.. Design, fabrication and testing of space-borne SiC mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 179-184. (in Chinese)
- [4] 姚旺,张宇民,韩杰才,等. 反应烧结碳化硅的磨削特性[J]. 无机材料学报, 2012, 27(7):764-768.
YAO W, ZHANG Y M, HAN J C, et al.. Grinding characteristics of reaction bonded silicon carbide [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2012, 27(7): 764-768. (in Chinese)
- [5] 池宪,吴凡,锁小红. C-SiC 陶瓷基复合材料磨削参数优化研究[J]. 航空精密制造技术, 2012, 48(1): 41-43.

4 结 论

本文对 SiC 材料在普通磨削和超声振动辅助磨削两种磨削方式下的磨削特性进行了研究,结果表明:普通磨削过程中磨削力比随磨削参数变化明显,而超声振动辅助磨削过程中的磨削力比变化较为平缓且数值减小近 1/3,对于提高 SiC 陶瓷磨削稳定性具有较大优势。在超声振动辅助磨削过程中,砂轮表面磨粒对 SiC 材料加工表面产生高频冲击,使工件表面形成大量微破碎。取代普通磨削方式下大尺度断裂破碎为主的材料去除方式,工件表面形貌及亚表面损伤得到了较大程度改善;超声振动辅助磨削工件亚表面裂纹最大深度及密度降低,亚表面横向裂纹得到较大程度抑制,在进给速度为 150~550 mm/min 内变化较小,可以有效改善工件质量,提高加工效率。

- CHI X, WU F, SUO X H. Research of grinding parameters about C-SiC ceramic matrix composite [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2012, 48(1):41-43. (in Chinese)
- [6] 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, 48:698-710.
- [7] 刘运凤,荆君涛,李占杰. 旋转超声磨削加工中刀具结合剂类型与加工性能的关系[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9):2021-2028.
LIU Y F, JING J T, LI ZH J. Relationship between bond patterns of tools and working performance in rotary ultrasonic grinding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9):2021-2028. (in Chinese)
- [8] 荆君涛,刘运凤,李占杰,等. 旋转超声磨削加工中影响磨具寿命的结构参数优化[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4):972-979.
JING J T, LIU Y F, LI ZH J, et al.. Optimization of structure parameters affecting tool life in rotary ultrasonic grinding machining [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4):972-979. (in Chinese)
- [9] JI R J, LIU Y H, ZHANG Y Z, et al.. Optimizing machining parameters of silicon carbide ceramics with ED milling and mechanical grinding combined process [J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*,

- 2010,51:195-204.
- [10] GAO G F, ZHAO B, XIANG D H, *et al.*. Research on the surface characteristics in ultrasonic grinding nano-zirconia ceramics [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009,209:32-37.
- [11] YANG X B, HAN J C. Experimental study on ultrasonic vibration grinding of brittle optical materials [J]. *Optical Technology*, 2007,33(1):65-67.
- [12] GONG H, FANG F Z, HU X T. Kinematic view of tool life in rotary ultrasonic side milling of hard and brittle materials [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2010,50:303-307.
- [13] GUO B, ZHAO Q L, JACKSON M J. Ultrasonic vibration assisted grinding of micro-structured surfaces on silicon carbide ceramics materials [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2012:553-559.
- [14] 李伯民,赵波. 现代磨削技术[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- LI B M, ZHAO B. *Modern Grinding Technology* [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [15] MULT H C, SPUR G, HOLL S E. Ultrasonic assisted grinding of ceramics [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 62: 287-293.

作者简介:



刘立飞(1987—),男,山东聊城人,博士研究生,2008年于山东大学获得学士学位,2010年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事硬脆材料非球面精密超精密磨削加工技术相关研究。E-mail: liulf_87@163.com

导师简介:



张飞虎(1964—),男,河南郑州人,博士,教授,博士生导师,1984年、1987年于西北工业大学获分别获得学士学位、硕士学位,1993年于哈尔滨工业大学获博士学位,主要从事精密超精密加工与纳米技术的研究,包括超精密加工新工艺及设备(ELID磨削等)、纳米级超光滑表面加工技术及表面质量、新型功能材料的精密和超精密加工、光学非球面加工、硬脆材料精密和高效磨削技术的研究。E-mail: zhangfh@hit.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)