

工程陶瓷高效精密磨削加工技术的研究进展

夏涛^{a,b}, 邓朝晖^{a,b}, 刘伟^{a,b}, 李重阳^{a,b}, 万林林^{a,b}

(湖南科技大学 a. 智能制造研究院; b. 难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要:工程陶瓷具有许多优异的性能,已广泛用于各工业行业中。介绍了现阶段实现工程陶瓷高效精密磨削加工的方法,诸如高速深磨、激光预热辅助磨削、ELID 镜面磨削、超声振动辅助磨削、预应力磨削以及复合工艺磨削等。从磨削效率、加工质量、成本、局限性等方面比较了这几种加工方法的优缺点。对工程陶瓷高效精密磨削加工技术的研究进行了展望。

关键词:工程陶瓷;材料去除机理;高效精密磨削方法;复合工艺磨削

中图分类号:TG580.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)05-0001-03

Research Progress of High Efficiency and Precision Grinding Technology for Zirconia Ceramics

XIA Tao^{a,b}, DENG Zhaohui^{a,b}, LIU Wei^{a,b}, LI Zhongyang^{a,b}, WAN Linlin^{a,b}

(a. Intelligent Manufacturing Institute and b. Hunan Provincial Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining of Difficult-to-Cut Material, Hunan University of Science Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Due to engineering ceramics with many excellent properties, so they are widely used in various industries. In this paper, the methods for high efficiency and precision grinding of the engineering ceramics are introduced, such as high speed deep grinding, laser preheating assisted grinding, ELID mirror grinding, ultrasonic grinding, prestressing grinding and composite grinding. The advantages and disadvantages of these methods are compared in terms of grinding efficiency, processing quality, cost and limitation. The research progress of high efficiency and precision grinding technology for the engineering ceramics is in prospect.

Keywords: engineering ceramics; material removal mechanism; high efficiency precision grinding method; composite process grinding

0 引言

工程陶瓷具有轻质、抗腐蚀、耐高温、热膨胀系数小、抗热震能力和自润滑能力强、耐磨损和摩擦系数低等优异性能,目前已广泛应用在能源工程、汽车工业、机械、化工石油、航空航天、冶金建材以及军事工程等领域^[1]。然而,工程陶瓷也存在一些缺陷,主要表现为脆性大(易产生裂纹)、均匀性差、韧性低、强度低、可靠性差、加工性差。

目前,工程陶瓷主要的加工方法是磨削加工。但工程陶瓷磨削加工的高成本和难以测控的加工表面损伤层不利于工程陶瓷的广泛应用和推广^[2-3]。因此,国内外学者对工程陶瓷材料的高效精密磨削加工技术进行了相关研究,取得良好效果。

文中首先分析了工程陶瓷高效精密磨削加工的理论依据,然后从磨削效率、加工质量、成本、局限性等方面比较了高速深磨、超声磨削等高效精密磨削工艺的优缺点,综述和展望了工程陶瓷高效精密磨削加工技术的研究进展,可为工程陶瓷高效精密磨削加工提供指导。

1 工程陶瓷高效精密磨削加工的理论依据

一般认为工程陶瓷在磨削加工时,材料去除机理可以

分为塑性去除、脆性去除和粉末化去除^[4-5]。由于普通磨削工程陶瓷一般是脆性和粉末化去除。陶瓷磨削表面质量较差,表面和亚表面裂纹的存在会在使用中产生问题,很难满足使用要求。所以,要想实现高效精密磨削,就要保证氧化锆陶瓷磨削在塑性去除的同时提高磨削效率。

Bifano 等根据其延性域磨削方式的定义:脆性材料被磨削表面的破碎表面相对面积率 $<10\%$,采用了临界磨削进给量(率) d_c 来替代临界压痕尺寸 a_c ,建立的 d_c 模型为:

$$d_c = 0.15 \frac{E}{H} \left[\frac{K_{IC}}{H} \right]^2 \quad (1)$$

式中: E 是材料的弹性模量; H 是硬度; K_{IC} 是静态断裂韧性。利用该模型可进行相关判断,在工程陶瓷磨削时控制好磨削、切削深度就可以实现延性域(塑性)去除。

但是,式(1)是静态条件下的,在动态磨削条件下并不准确。近些年关于工程陶瓷延性域磨削的研究发现影响动态临界切深的因素主要有:磨削的砂轮速度、动态断裂韧性、磨料的尺寸和几何形状、润滑条件^[6]等。即提高临界切深有助于实现工程陶瓷的高效精密磨削。

2 工程陶瓷高效精密磨削方法

当前,有助于实现工程陶瓷的高效精密磨削加工的方法主要有下述几种。

2.1 高速深磨

高速深磨,又称高效深磨,是一种先进的磨削技术,它结合了深切缓进给磨削和高速、超高速磨削,并得到了快速的发展。高速深磨在工程陶瓷磨削方面应用广泛,可对工程陶瓷材料实现延性域磨削加工^[7]。

谢桂芝等^[8-9]对工程陶瓷进行了高速深磨的研究试验。结果表明:在高速磨削过程中,增大砂轮线速度,可以减小磨削力;材料由脆性去除向塑性去除转变,陶瓷表面质量得到改善。

高速深磨在工程陶瓷磨削加工应用方面有很好的应用前景。它不仅仅能够改善磨削表面质量还能提高加工效率,降低加工成本。

2.2 激光加热辅助磨削加工

激光辅助加工是一种利用高功率激光局部加热工件的混合加工方法,它可以让陶瓷材料局部产生软化从而实现塑性磨削。与普通磨削加工相比,激光加热辅助磨削具有减小材料去除比能、磨削力、残余应力、刀具磨损等优势,并且可以大大降低加工成本,有助于工程陶瓷的发展与应用^[10-11]。Xu S^[12]对 SiC、Zr2O3、莫来石陶瓷等做了激光加热辅助磨削加工的相关研究,研究表明激光加热辅助磨削加工能加大材料去除率、减小刀具磨损,得到更好的表面质量。这主要是由于激光辅助磨削加工时,工程陶瓷等硬脆材料脆性去除比例减小而塑性去除的比例增加。

2.3 ELID 镜面磨削

在线电解修整(ELID)镜面磨削技术是一项新型磨削技术^[13]。在磨削时,砂轮表面的金属结合剂被不断去除的同时铸铁集体溶解而露出内部的磨粒,实现砂轮的自修整。这一技术既能延长砂轮的使用寿命,又能得到良好的加工表面质量。

目前 ELID 镜面磨削技术广泛应用于工程陶瓷的镜面磨削,可以对工程陶瓷等硬脆材料实现高磨削效率、高表面质量和高精度的磨削加工^[14]。

陈明君^[15]采用 ELID 镜面磨削技术对脆性材料,如硬质合金、陶瓷材料和光学玻璃等进行了磨削加工,得到了高的表面质量,实现了镜面磨削,并且工件的表面粗糙度达到了纳米级。H.Tang^[16]利用 ELID 镜面磨削技术对氧化锆基陶瓷进行了磨削试验研究,结果表明与传统的平面磨削相比,ELID 磨削显示出了良好的稳定性,可以提高加工效率,改善表面质量。

2.4 超声振动辅助磨削

超声振动辅助磨削技术是将超声波加工技术和传统磨削技术结合在一起,具有众多的优点^[17-18]。与传统的磨削加工技术相比,超声振动辅助磨削切削力小、切削尺寸小。加工工程陶瓷等硬脆材料时,可以得到更好的表面质量和更高的材料去除率。

马辉^[19]、闫艳燕^[20]对工程陶瓷进行了普通磨削和超声振动辅助磨削的对比研究。实验表明超声振动辅助磨削的临界切削深度是普通磨削的 2~3 倍。其材料去除率

是普通磨削的 2.5~5.5 倍,影响去除率的主要因素有:超声的频率、磨削工艺参数、超声影响下的材料硬度和动态断裂韧性。超声振动辅助磨削能够改变陶瓷材料的去除方式,提高表面质量。

超声振动辅助磨削相较于普通磨削的优势在于它的临界磨削深度要远远大于普通磨削,这一点也就决定了超声振动辅助磨削可以选择较大的磨削深度,在提高磨削去除率的同时还能改善磨削表面质量。

2.5 预应力磨削加工

为了降低工程陶瓷磨削时产生的表面/亚表面损伤,提高磨削加工质量和加工效率,可以在磨削加工过程中对工件施加一定的预应力,改变内部的应力状态,从而改善磨削加工后工件的表面质量,增加工件使用的可靠性。张温亚^[21]对氧化锆陶瓷进行了单点预应力磨削实验,用超景深显微镜可以明显看出,在切削深度为 5 μm 时预应力 400 MPa 比 0 MPa 沟槽宽度窄并且边缘破碎较少。

所以对工程陶瓷进行预应力磨削加工可以得到更好的磨削质量,有助于实现工程陶瓷的高效精密磨削。

2.6 其他复合工艺磨削

对硬脆材料磨削加工的各种方法一般都存在一定的局限性,为了解决这些局限性,满足一些具体的加工要求,许多学者采用了复合磨削的方法。例如,超声 ELID 复合磨削技术^[22]将超声振动辅助磨削与在线电解修整技术相结合,预计将成为未来重要的发展趋势之一^[23]。邵水军^[24]建立了工程陶瓷超声 ELID 复合磨削加工的单颗磨粒临界切深模型:

$$a_c = K_v \sqrt{\frac{2\lambda_0}{\zeta \tan^2 \theta} \left(\frac{K_D}{H_v} \right)^2} \quad (2)$$

从式(2)中可以明显地看出,影响超声 ELID 复合磨削加工质量的因素有很多,其中 K_v 是与超声、ELID 对单颗磨粒临界切削深度的影响系数,该值大于 1,它与材料硬度的变化密切相关,即超声 ELID 复合磨削加工的临界切深要大于普通磨削的临界切深,这就更容易实现高效精密磨削。除了上述复合工艺磨削的方法,如何将其他不同的方法结合起来对工程陶瓷进行高效精磨也值得研究。现在有很多学者研究了将不同的磨削方式复合起来对各种材料进行加工,并得到了很好的效果。这些方法也可以借鉴到工程陶瓷的磨削加工中。例如 Yin Shaohui 等^[25]对 BK7 玻璃、微晶玻璃、碳化硅等材料的研究表明,可以用磁流变技术与 ELID 技术相复合的加工方法加工,并在短时间内获得了亚微米级表面和峰谷值极低的形状精度。王树启等^[26]对硬脆材料用 ELID 磨削与高速磨削加工相结合的方式进行了加工,实现了磨削效率大大提升的同时也得到了更高的加工精度。所以复合工艺磨削是今后工程陶瓷高效精密加工研究的一个重要方向。

3 工程陶瓷高效精密磨削加工方法的优缺点

上述加工方法都可以实现工程陶瓷的高效精密磨削,

但是有的方法存在一些缺点,并不是在所有条件下都适用。表1从磨削效率、加工质量、成本、局限性等方面比较了上述加工方法的优缺点,为工程陶瓷高效精密磨削加工的加工方法选择提供参考。

表1 高效精密磨削方法优缺点比较表

加工方法	优点	缺点
高速深磨	去除率高	砂轮磨损严重
激光预热辅助磨削	材料由脆性向塑性转变,可加工形状复杂的零件	需要控制好磨削区温度,温度过高时磨削质量差
ELID 镜面磨削	磨削效率高,表面质量好,综合成本低	对砂轮要求较高,装置复杂
超声磨削	可以大大增加临界磨削厚度,提高磨削效率	需要控制好超声振动的频率以及方向
预应力磨削	使部分拉应力变为压应力,改善加工质量	需要预先施加应力,复杂形状的零件难加工
复合工艺磨削	能够实现一些形状复杂,高表面质量零件的加工	复合工艺相对复杂

4 结语

1) 影响工程陶瓷精密磨削动态临界切深的因素有很多,目前建立的动态临界切深模型还不够准确,模型中的相关参数还需要进一步确定。建立较准确的动态临界切深模型,有利于指导如何提高临界切深,从而实现工程陶瓷的高效精密磨削。

2) 工程陶瓷高效精密磨削加工工艺参数对磨削质量和加工效率有很大的影响,研究如何设计磨削工艺参数,在保证磨削质量的前提下大大提高磨削效率,对实现工程陶瓷的高效精密磨削具有很重要的意义。

3) 现阶段,虽然很多磨削工艺方法都能基本实现工程陶瓷的高效精密磨削,但都有各自的缺点或一定的局限性,如何改善这些加工方法或研究出新的复合工艺磨削方法来提高磨削效率和磨削质量、减小砂轮磨损,是今后研究的重点。

参考文献:

- [1] Pawar K. New trends in manufacturing in ceramic industry [J]. International Journal of Ceramics and Ceramic Technology, 2016, 2(1):18-20.
- [2] 龚琪,沈景凤,谢建林. 工程陶瓷材料的加工技术及应用进展研究[J]. 人工晶体学报, 2016, 45(7):1898-1905.
- [3] 唐修检,田欣利,吴志远,等. 工程陶瓷边缘碎裂行为与机理研究进展[J]. 中国机械工程, 2010(1):114-119.
- [4] 邓朝晖,张璧,孙宗禹,等. 陶瓷磨削材料去除机理的研究进展[J]. 中国机械工程, 2002, 13(18):1608-1611.
- [5] 张璧,孟鉴. 工程陶瓷磨削加工损伤的探讨[J]. 纳米技术与精密工程, 2003, 1(1):48-56.
- [6] Yang M, Li C, Zhang Y, et al. Maximum undeformed equivalent chip thickness for ductile-brittle transition of zirconia ceramics under different lubrication conditions [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 122:55-65.
- [7] 杨洪波,赵恒华,刘伟锐. 磨削技术的现状和未来发展趋势[J]. 机械制造与自动化, 2014, 43(6):7-9.
- [8] 谢桂芝,黄红武,黄含,等. 工程陶瓷材料高效深磨的试验研究[J]. 机械工程学报, 2007, 43(1):176-184.
- [9] Xie G Z, Huang H. An experimental investigation of temperature in high speed deep grinding of partially stabilized zirconia [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48(14):1562-1568.
- [10] Venkatesan K, Ramanujam R, Kuppan P. Laser Assisted Machining of Difficult to Cut Materials: Research Opportunities and Future Directions-A Comprehensive Review [J]. Procedia Engineering, 2014, 97:1626-1636.
- [11] Tadavani S A, Razavi R S, Vafaei R. Pulsed laser-assisted machining of Inconel 718 superalloy [J]. Optics & Laser Technology, 2017, 87:72-78.
- [12] Xu S, Yao, Zhenqiang, Cai, Huangyue, et al. An experimental investigation of grinding force and energy in laser thermal shock-assisted grinding of zirconia ceramics [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(9):1-8.
- [13] 伍俏平,王煜,瞿为,等. 在线电解修整磨削液研究现状及其展望[J]. 中国机械工程, 2017, 28(9):1118-1125.
- [14] 徐志强,尹韶辉,姜胜强,等. 在线电解修整磨削与化学机械抛光相结合的蓝宝石基片组合加工技术[J]. 中国机械工程, 2018, 29(11):1310-1315.
- [15] 陈明君,董申,李旦,等. 单晶硅脆性材料塑性域超精密磨削加工的研究 [J]. 航空精密制造技术, 2000, 36(4):8-11.
- [16] Tang H, Deng Z H, Guo Y S, et al. Depth-of-cut errors in ELID surface grinding of zirconia-based ceramics [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2015, 88:34-41.
- [17] 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 & Manufacture, 2016, 104:58-67, 18.
- [18] Lauwers B. Surface Integrity in Hybrid Machining Processes [J]. Procedia Engineering, 2011(1):241-251.
- [19] 马辉. 基于非局部理论的 ZTA 纳米复相陶瓷超声加工延性高效本质特征研究[D]. 上海:上海交通大学, 2011.
- [20] 闫艳燕,栗成杰,赵波,等. 二维超声磨削纳米氧化锆陶瓷的磨削力特性研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(11):1270-1274.
- [21] 张温亚. 工程陶瓷单点预应力磨削试验研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2017.
- [22] 刘折,赵波,郑友益,等. 超声 ELID 复合磨削陶瓷材料高效去除机理的仿真研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2014(5):27-31.
- [23] 尹韶辉,曾宪良,范玉峰,等. ELID 镜面磨削加工技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2010(6):750-755.
- [24] 邵水军. 纳米陶瓷超声 ELID 复合磨削加工机理及其表面质量研究[D]. 焦作:河南理工大学, 2016.
- [25] Yin Shaohui, Ohmori H, Lin Weimin, et al. Study on ultrasonic synergistic finishing process of ELID-grinding and MRF [J]. JSAT, 2006, 50(6):39-44.
- [26] 王树启. 砂轮在线电解修锐(ELID)技术在工程陶瓷高速磨削中的应用研究[D]. 长沙:湖南大学, 2006.

收稿日期:2019-03-11