杯形砂轮磨削氮化硅陶瓷表面形貌

王少雷^{①②}, 林彬^{①*}, 王岩^①, 曹晓燕^①, 张晓峰^①

① 天津大学先进陶瓷与加工技术教育部重点实验室, 天津 300072;

② 河北建筑工程学院, 张家口 075000

* 联系人, E-mail: tdlinbin@126.com

2014-05-14 收稿, 2014-07-29 接受, 2014-11-03 网络版发表

北京市科技计划(D131100002713001)资助

摘要 磨削参数对工件表面加工质量有重要影响. 杯形砂轮大切深缓进给端面磨削方法是一种高效、高精度硬脆材料加工方法. 本文研究了利用此加工方法加工氮化硅陶瓷材料时, 磨削深度参数与加工表面形貌之间的关系. 利用一种非接触式白光干涉仪对工件表面形貌进行了测量和分析, 发现随着磨削深度的增大, 表面粗糙度无明显变化, 而表面波纹度则受到显著影响.

关键词

表面形貌
杯形砂轮
大切深缓进给磨削
粗糙度
波纹度

氮化硅(Si_3N_4)具有优良的物理和化学特性, 例如, 高硬度、高温稳定性和优良抗磨损性能, 这些特性使 Si_3N_4 被广泛应用于航空航天和核工业等重要领域; 同时, 也使 Si_3N_4 成为难加工硬脆材料. 如何高效高精度地对其进行机加工成为一个重要研究领域.

磨削是硬脆材料零部件的重要加工方法. 磨削获得的零件表面形貌对零件的服役性能有重要影响^[1]. Li等人^[2]研究了改变磨削深度对 Si_3N_4 磨削质量的影响, 结果显示存在1个最优磨削深度, 大于此磨削深度, 砂轮磨损急剧加重, 表面磨削质量大幅下降. Huang等人^[3]研究了砂轮线速度改变时对材料去除机理和磨削表面质量的影响, 发现大粒度砂轮的线速度对表面质量无明显影响; 对于小粒度砂轮, 其线速度对表面加工质量有显著影响. Guo等人^[4]利用平型金刚石砂轮, 研究了轴向缓进给磨削方法加工 Si_3N_4 表面形貌, 发现脆性断裂是其最主要的材料去除模式, 亚损伤留有大量裂纹. Chen等人^[5]利用钎焊金刚石砂轮, 研究了高速磨削 Si_3N_4 时的磨削特性和材料去除机理, 并检测了磨削表面的形貌特性, 指出磨削过程中塑性去除模式是材料去除的主要模式. Qiao等人^[6]研究了超声振动辅助铣磨氮化硅时的粗

糙度并发现砂轮转速对表面粗糙度的影响最大, 其次是进给速度和磨削深度. Jing等人^[7]研究了旋转超声辅助磨削(RUGM)技术处理 Si_3N_4 时磨削力与加工质量之间的关系, 指出借助RUGM技术可使磨削力比传统端面磨削下降25%, 表面加工质量随磨削力下降而得到改善. 上述研究分别从磨削参数、磨削工具类型、磨削辅助条件等角度对 Si_3N_4 加工表面形貌进行了研究, 所关注的核心问题是如何通过调整这些因素提高磨削加工所获得的表面质量, 并未过多考虑这些因素的调整对材料去除率的影响, 甚至表面加工质量的提高是以牺牲效率为前提的. 如何在保证加工质量的同时, 提高加工效率成为一个十分关键的问题. 针对此问题, 近年来涌现出多种高效磨削技术, 杯形砂轮缓进给端面磨削技术便是其中之一.

杯形砂轮端面磨削如图1所示, 具体方法和特点如下^[1,8-10]: (1) 杯形砂轮磨削工件时, 裂纹主要出现在主磨削部分和过渡区与材料相接触的部分, 而这部分正是要去除的材料. 裂纹随着磨屑的去除而消失, 残留在磨削表面上的裂纹较少; (2) 修磨部分形成工件的主要成型面. 由于磨粒在这一阶段的加工

引用格式: 王少雷, 林彬, 王岩, 等. 杯形砂轮磨削氮化硅陶瓷表面形貌. 科学通报, 2015, 60: 316-321

Wang S L, Lin B, Wang Y, et al. Surface morphology of grinding of Si_3N_4 with cup grinding wheel (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 316-321, doi: 10.1360/N972014-00460

图1 杯形砂轮端面磨削示意图

Figure 1 Illustration about face grinding with a cup wheel

量级逐渐减少, 趋近于零, 所以可以获得完整的加工表面; (3) 杯形砂轮端面磨削工件时, 修磨部分整个表面参与磨削, 由于材料的去除量很小, 因此砂轮的磨损量很小, 不需要经常修整砂轮就能够加工出精度很高的工件。

杯形砂轮缓进给端面磨削技术是一种重要的高效磨削技术, 由于其高材料去除率和表面加工质量等特点, 被广泛应用于黑金属与硬脆材料加工领域。然而, 迄今为止, 对于此加工方法加工硬脆材料的表面质量研究鲜有文献报道。本文以典型硬脆材料氮化硅为试件, 对杯形砂轮缓进给端面磨削过程中, 磨削深度和磨削速度对加工质量的影响进行了研究。

1 实验

实验所用 Si_3N_4 材料由反应烧结法生成, 其密度为 3.44 g/cm^3 , 莫氏硬度9.3。 Si_3N_4 试件为 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ 的立方块, 每次加工完毕后, 实验样件表面用超声冲洗。

实验在汉川XH716E立式四轴加工中心上实施, 其定位精度为 0.003 mm , 重复定位精度为 0.001 mm ; 将 Si_3N_4 试件用虎头钳固定在机床工作台上, 砂轮往复加工去除工件材料。每完成1组参数后, 利用非接触式白光干涉3D轮廓仪(Nanoview2000, 上海爱建纳米科技发展公司)测量加工后的工件表面形貌, 并建立表面形貌3D模型。该仪器分辨率为 1 nm , 观察范围为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 扫描步长设定为 0.030 mm 。

实验所用砂轮为电镀金刚石(SDC)砂轮, 砂轮粒

度为100#, 砂轮直径为 20 mm , 所采用磨削方法为缓进给端面磨削法。磨削过程中, 磨削深度 a_p 为10, 15, 20, $25 \mu\text{m}$, 进给速度 v_f 为 30 cm/min 。

磨削实验过程中所采用的冷却液为水基乳化液, 根据文献[11], 乳化液是缓进给磨削最适宜采用的水溶性磨削液。

2 结果与分析

2.1 表面粗糙度

图2(a)~(d)分别显示了磨削深度为10, 15, 20和 $25 \mu\text{m}$ 的表面粗糙度情况。结果显示, 随着磨削深度的增加, 最大的峰值高度 S_p 和最小的峰谷值 S_v 无明显变化, 在 $0 \sim 0.13 \mu\text{m}$ 之间变化。这一现象同文献[2]所提到的现象不同, 该文献指出粗糙度随磨削深度的变大而明显变大, 出现这种现象是由于杯形砂轮的修磨作用改善了表面加工质量。如图2(a)所示, 红色的磨削痕迹分散得很稀疏, 并且大部分区域呈现绿色, 这表明当磨削深度较浅时, 表面受到损伤层很薄并且易于被砂轮修磨区域去除, 进而表面加工质量得到改善。在图2(b)~(d)中, 随着磨削深度增加, 红色痕迹区域的分布越来越密, 大部分区域被红色磨痕所占据, 均方根值 S_p 大于图2(a)中的值。这表明随着磨削深度的增加, 杯形砂轮主磨削区域的材料去除作用远大于修磨区域所起到的作用, 即主磨削区域去除材料造成的材料表面裂纹和亚表面损伤层已经无法被砂轮修磨区域完全去除, 而达到被修复的目的, 尽管 S_p 和 S_v 的值在图2(a)~(d)中十分接近(图3)。

2.2 平均功率谱密度和波纹度

图4为粗糙度平均功率谱密度函数曲线。图4(a)显示当磨削深度为 $10 \mu\text{m}$ 时, 轮廓波长主要集中在 $3.66 \mu\text{m}$ 附近; 图4(b)显示当磨削深度为 $25 \mu\text{m}$ 时, 轮廓波长主要集中在 $3.56 \mu\text{m}$ 附近。这说明随着磨削深度增加, 磨削表面上的峰谷分布更加密集, 反映了随着磨削深度的增加, 粗糙度峰值和谷值的分布变化呈现出频率越来越密集的特点。

表面波纹度值通常大于表面粗糙度值而小于表面几何尺寸误差。表面波纹度信息主要反映了机床工具系统的振动刚度特性, 影响着加工后工件的使用性能。如图5(a)所示, 当磨削深度为 $10 \mu\text{m}$ 时, 表面波纹度变化十分平滑, 但随着磨削深度的增加, 表

图2 不同切深时的表面粗糙度. (a) $a_p=10\ \mu\text{m}$, $v_f=30\ \text{cm/min}$; (b) $a_p=15\ \mu\text{m}$, $v_f=30\ \text{cm/min}$; (c) $a_p=20\ \mu\text{m}$, $v_f=30\ \text{cm/min}$; (d) $a_p=25\ \mu\text{m}$, $v_f=30\ \text{cm/min}$. 观察范围为 $2\ \text{mm} \times 2\ \text{mm}$

Figure 2 Surface roughness for different grinding depth ($2\ \text{mm} \times 2\ \text{mm}$). (a) $a_p=10\ \mu\text{m}$, $v_f=30\ \text{cm/min}$; (b) $a_p=15\ \mu\text{m}$, $v_f=30\ \text{cm/min}$; (c) $a_p=20\ \mu\text{m}$, $v_f=30\ \text{cm/min}$; (d) $a_p=25\ \mu\text{m}$, $v_f=30\ \text{cm/min}$

图3 不同切深时 S_p 和 S_v 值对比

Figure 3 Comparative value between S_p and S_v

面波纹度变化越来越剧烈(图 5(b)~(d)). 这表明随着磨削深度的增大, 磨削力变得越来越大, 机床系统的振动对工件表面加工质量影响越来越显著.

与磨削金属所产生的表面缺陷不同, Si_3N_4 陶瓷磨削加工后的表面存在着多种样式的缺陷, 如碎片、裂纹、凹坑等. 根据硬脆材料磨削表面断裂损伤模型,

单颗磨粒压入硬脆材料工件表面, 随着压力的增加, 磨粒下产生裂纹, 崩裂出碎片, 表面残留下多个凹坑. 如图6所示, 磨削后表面形貌由一系列峰谷组成. 凹陷处大多呈现圆形凹坑状, 表明加工过程中材料的去除模式以脆性去除方式为主. 随着磨削深度的增大, 材料脆性去除模式越来越明显, 峰谷的分布密度变得更大. 但是, 由于杯形砂轮的修磨效果, 不同切深时, 粗糙度值都在 $0\sim 0.13\ \mu\text{m}$ 之间变化. 正是由于杯形砂轮的修磨作用去除了主磨削刃所产生的磨削损伤层.

3 结论

高效率和高表面质量是磨削加工追求的2个主要目标, 但这2个目标往往互相制约. 材料去除效率提高, 磨削深度增大, 往往会导致工件表面加工质量的下降; 而为提高表面加工质量, 往往通过减少磨削深度, 降低材料去除率来实现. 本文通过研究发现, 在杯形砂轮缓进给端面磨削加工过程中, 随着磨削深

图4 平均功率谱密度. (a) $a_p=10 \mu\text{m}$, $v_f=30 \text{ cm/min}$; (b) $a_p=25 \mu\text{m}$, $v_f=30 \text{ cm/min}$

Figure 4 The average power spectrum density. (a) $a_p=10 \mu\text{m}$, $v_f=30 \text{ cm/min}$; (b) $a_p=25 \mu\text{m}$, $v_f=30 \text{ cm/min}$

图5 表面波度. (a) $a_p=10 \mu\text{m}$, $v_f=30 \text{ cm/min}$; (b) $a_p=15 \mu\text{m}$, $v_f=30 \text{ cm/min}$; (c) $a_p=20 \mu\text{m}$, $v_f=30 \text{ cm/min}$; (d) $a_p=25 \mu\text{m}$, $v_f=30 \text{ cm/min}$. 观察范围为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$

Figure 5 Surface waviness ($2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$). (a) $a_p=10 \mu\text{m}$, $v_f=30 \text{ cm/min}$; (b) $a_p=15 \mu\text{m}$, $v_f=30 \text{ cm/min}$; (c) $a_p=20 \mu\text{m}$, $v_f=30 \text{ cm/min}$; (d) $a_p=25 \mu\text{m}$, $v_f=30 \text{ cm/min}$

图 6 3D 表面形貌图. (a) $a_p=10\ \mu\text{m}$, $v_f=30\ \text{cm/min}$; (b) $a_p=15\ \mu\text{m}$, $v_f=30\ \text{cm/min}$; (c) $a_p=20\ \mu\text{m}$, $v_f=30\ \text{cm/min}$; (d) $a_p=25\ \mu\text{m}$, $v_f=30\ \text{cm/min}$

Figure 6 3D surface topography. (a) $a_p=10\ \mu\text{m}$, $v_f=30\ \text{cm/min}$; (b) $a_p=15\ \mu\text{m}$, $v_f=30\ \text{cm/min}$; (c) $a_p=20\ \mu\text{m}$, $v_f=30\ \text{cm/min}$; (d) $a_p=25\ \mu\text{m}$, $v_f=30\ \text{cm/min}$

度的增加, 磨削表面粗糙度值无明显变化, 这表明此种加工方法在提高材料去除率的同时, 保证了表面粗糙度, 一定程度上避免了上述矛盾; 同时由于磨削

深度的增加, 导致磨削力增大, 致使表面波纹度增加. 本文的研究为该磨削技术的研究和应用提供了有意义的参考.

参考文献

- 1 Yu S Y, Lin B. The processing technology and its application of engineering ceramic materials (in Chinese). Beijing: Machinery Industry Press, 2008. 180–193, 207–213 [于思远, 林彬. 工程陶瓷材料的加工技术及其应用. 北京: 机械工业出版社, 2008. 180–193, 207–213]
- 2 Li W, Wang Y, Fan S, et al. Wear of diamond grinding wheels and material removal rate of silicon nitrides under different machining conditions. *Mater Lett*, 2007, 65: 54–58
- 3 Huang H, Yin L, Zhou L. High speed grinding of silicon nitride with resin bond diamond wheels. *J Mater Process Technol*, 2003, 141: 329–336
- 4 Guo F, Tian X L, Wang J Q, et al. The morphology analysis of axial creep-feed grinding about engineering ceramics with a small grinding wheel. *Adv Mater Res*, 2012, 452: 66–71
- 5 Chen J, Shen J, Huang H, et al. Grinding characteristics in high speed grinding of engineering ceramics with brazed diamond wheels. *J Mater Process Technol*, 2010, 210: 899–906
- 6 Qiao G, Zhou M, Wang M. Study on surface roughness in ultrasonic vibration mill-grinding of hot pressed Si_3N_4 . *Int J Abras Technol*, 2012, 5: 121–129

- 7 Jing J T, Zhao H, Liu Y F, et al. Investigation on the cutting force of machining process for Si_3N_4 engineering ceramics. *Int J Nano*, 2013, 9: 148–163
- 8 Lin B, Yu S Y, Xu Y S. A research on grinding temperature of ZrO_2 and SiC (in Chinese). *J Tianjin Univ*, 2000, 6: 740–742 [林彬, 于思远, 徐燕申. ZrO_2 和 SiC 陶瓷的表面磨削温度. 天津大学学报, 2000, 6: 740–742]
- 9 Zhu A J, Lin B, Zhang F, et al. Rational selection of experimental parameter of grinding engineering ceramic (in Chinese). *Tool Technol*, 2006, 40: 23–25 [朱爱菊, 林彬, 张方, 等. 工程陶瓷磨削试验参数的合理选择. 工具技术, 2006, 40: 23–25]
- 10 Li G, Lin B, Bai Z Z, et al. The research on superfine processing technology of high-quality ceramic parts (in Chinese). *Chin Sci Bull (Chin Ver)*, 1991, 36: 1188–1191 [李刚, 林彬, 白志忠, 等. 优质陶瓷零件的超精加工技术研究. 科学通报, 1991, 36: 1188–1191]
- 11 Wang X Q. The research about cooling liquid applied in creep grinding (in Chinese). *World Manuf Technol Equip Market*, 1995, 4: 68–69 [汪星桥. 缓进给磨削用的冷却液研究. 世界制造技术与装备市场, 1995, 4: 68–69]

Surface morphology of grinding of Si_3N_4 with cup grinding wheel

WANG ShaoLei^{1,2}, LIN Bin¹, WANG Yan¹, CAO XiaoYan¹ & ZHANG XiaoFeng¹

¹ Key Laboratory of Advanced Ceramics and Machining Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

² Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, China

Grinding parameters affect the morphology of a machined surface. Creep-feed face grinding with a cup wheel is a highly efficient and highly precise grinding method for the manufacturing of hard and brittle materials. There is a trade-off between the rate of material removal and machining precision because substantial material removal necessitates a deep grinding depth that usually results in poor surface quality. The problem of how to machine a high-quality surface while maintaining a high removal rate is therefore important in precision grinding. This paper first introduces this grinding method. Si_3N_4 is an important engineering ceramic widely used in many fields, and to improve its ground surface quality, an experimental design is established to investigate the relationship between the grinding depth in this method and the ground surface morphology. Making a non-contact optical measurement, the surface morphology is derived and then analyzed. First, surface roughness is investigated for different grinding depths, showing that depth does not affect the surface roughness because the end face of the cup wheel has a regrinding effect. Second, the power spectrum density is investigated, showing that the peaks and valleys of the surface morphology are distributed with increasing intensity as grinding depth increases. Third, the machined surface's waviness is investigated, and is found to increase with the grinding depth. This is explained by the grinding force increasing with the depth, which intensifies the grinding machine's vibration. This paper reveals an important characteristic of this method in that the grinding depth has little effect on the roughness of the ground surface.

surface morphology, cup grinding wheel, creep-feed grinding, roughness, surface waviness

doi: 10.1360/N972014-00460