

氧化铝陶瓷旋转超声铣磨加工磨削力研究^①

王磊¹, 董金善², 杨林娟^{1,2}

(1.南通职业大学 机械工程学院, 江苏 南通 226007; 2.南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要: 以氧化铝陶瓷为加工对象, 采用小直径电镀砂轮进行了旋转超声铣磨和普通铣磨加工试验, 分析了铣磨氧化铝陶瓷时的磨削力随超声功率、砂轮线速度、进给速度、铣磨深度的变化规律。结果表明, 在其他铣磨参数不变时, 超声功率由 0 W 增大至 90 W, 磨削力呈下降趋势, 表面形貌得到显著改善。随着砂轮线速度增大、进给速度和铣磨深度减小, 旋转超声铣磨和普通铣磨时的磨削力均呈下降趋势。在试验加工参数范围内, 旋转超声铣磨的磨削力均低于普通铣磨时, 且旋转超声铣磨时最大可降低法向磨削力 24.17%、切向磨削力 23.30%。

关键词: 旋转超声; 电镀砂轮; 铣磨; 氧化铝陶瓷; 磨削力; 超声功率; 工艺参数

中图分类号: TG58

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.06.033

文章编号: 0253-6099(2023)06-0153-04

Grinding Force in Rotary Ultrasonic-Assisted Milling and Grinding of Alumina Ceramics

WANG Lei¹, DONG Jinshan², YANG Linjuan^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Nantong Vocational University, Nantong 226007, Jiangsu, China; 2. School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, Jiangsu, China)

Abstract: Experiments were carried out for alumina ceramics with rotary ultrasonic-assisted and ordinary milling-grinding processes respectively by using a small diameter electroplated grinding wheel. The variation of grinding force with ultrasonic power, linear speed of grinding wheel, feed rate and grinding depth during milling-grinding of alumina ceramics was analyzed. The results show that with ultrasonic power from 0 W up to 90 W and other parameters keeping constant, the grinding force is in decline and the surface topography is significantly improved. As the linear speed of grinding wheel increases, while the feed rate and grinding depth decrease, the grinding force in both rotary ultrasonic-assisted and ordinary milling-grinding processes decreases. With the processing parameters in the tested range, the grinding force in rotary ultrasonic-assisted milling-grinding process is lower compared to the ordinary milling-grinding process. Besides, the maximum reduction in normal and tangential grinding force of rotary ultrasonic-assisted milling and grinding can reach 24.17% and 23.30% respectively.

Key words: rotary ultrasonic; electroplated grinding wheel; milling and grinding; aluminum oxide ceramics; grinding force; ultrasonic power; processing parameters

随着现代工业快速发展, 人们对工程陶瓷材料的需求日益增多。氧化铝陶瓷具有硬度高、熔点高、绝缘性能和耐蚀性能好等优点, 是航空航天、过程装备、仪器仪表等领域的重要零部件材料^[1-2]。氧化铝陶瓷硬度大、脆性强, 属于难加工材料, 普通铣磨加工后工件表面损伤较严重, 制约了其进一步发展^[3-4]。旋转超声铣磨的加工方式可有效改善硬脆材料的加工性能^[5-6]。

文献[7]基于氧化铝陶瓷超声磨削实验, 研究了磨削力随主轴转速、进给速度、磨削深度以及砂轮粒度的影响规律, 并建立了磨削力模型。文献[8]建立了磨削力预测模型, 同时对氟金云母材料进行了超声振动辅助磨削, 研究了磨削力随主轴转速、进给速度、磨削深度和超声振幅变化的规律。文献[9]基于单晶硅材料, 研究了不同超声振动方向下超声辅助磨削时磨削

① 收稿日期: 2023-06-27

基金项目: 国家自然科学基金(52175171)

作者简介: 王磊(1968-), 女, 江苏南通人, 硕士, 副教授, 主要研究方向为机械装备设计与制造、特种精密加工等。

力的变化规律,并与普通磨削时的磨削力进行了对比。

磨削力是铣磨加工性能的重要评价指标之一^[10]。目前,业界对不同工艺参数下旋转超声铣磨氧化铝陶瓷磨削力影响规律的研究还不够充分。因此,本文以氧化铝陶瓷为加工对象,进行了普通铣磨和旋转超声铣磨对比试验^[11],研究了磨削力随铣磨参数的变化规律。

1 磨粒切削机理分析

进行铣磨加工时砂轮与工件的相对位置如图1所示。砂轮作旋转运动,在超声振动的作用下,砂轮沿着主轴轴线方向振动,同时工件沿着一定的方向和速度作进给运动。砂轮表面由多颗磨粒构成,为了能更直观简洁地分析加工时磨粒的切削轨迹及机理,绘制了两颗磨粒在不同超声功率条件下铣磨时的切削加工轨迹,如图2所示。从图2可以看出,超声功率0 W,即普通铣磨时,加工轨迹由两条相互平行的直线构成;旋转超声铣磨时,超声功率为 P_1 时,作用于砂轮上的振幅为 A_1 ,加工轨迹由两条正弦曲线构成,曲线与曲线之间相互交叠干涉;超声功率增加至 $P_2(P_2 > P_1)$ 时,作用于砂轮上的振幅为 A_2 ,两条正弦曲线的变化幅度更加明显。由此可见,超声振动的引入以及不同的超声功率使得磨粒对工件的切削轨迹发生变化,加工机理的改变会导致磨削力存在差异,进而影响工件的加工性能及表面形貌。图2表明,超声功率越大,切削轨迹振幅越大,加工的表面质量趋向于更好。

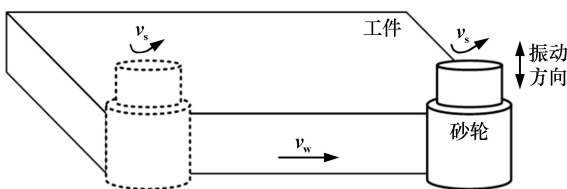


图1 铣磨加工示意图

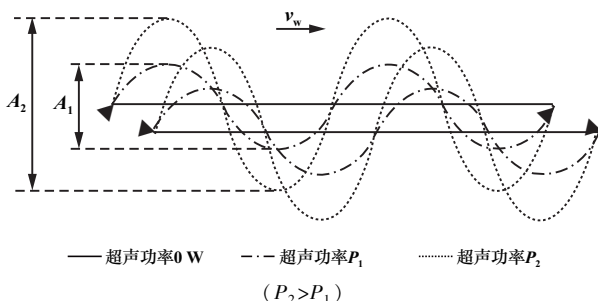


图2 磨粒切削轨迹示意图

2 试验条件

本试验所用机床为CY-VMC850加工中心。超声

系统装置装夹于机床主轴处。进行超声铣磨加工时,超声电源发出高频信号后,基于电磁感应原理将电能传递至超声刀柄上的线圈,再经过超声刀柄上换能器的转换和变幅杆的放大,最终将振动作用传递至砂轮上。关闭超声电源后即转换为普通铣磨加工。工件材料为氧化铝陶瓷,其长×宽×高为50 mm×50 mm×6 mm,材料性能参数如表1所示。刀具采用小直径电镀金刚石砂轮,直径14 mm,宽度10 mm,金刚石粒度为80[#](0.178 mm)。采用干磨的加工方式,通过调节机床工作台进给速度来实现工件进给速度的变化,选用的工艺参数如表2所示。采用KISTLER-9255B测力仪测量磨削力,采用KH-7700超景深显微镜观察工件表面形貌。

表1 材料性能参数

密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	断裂韧性 $K/(MPa \cdot m^{1/2})$	弹性模量 E/GPa	硬度(HV)/ GPa
3.83	4.8	350	88

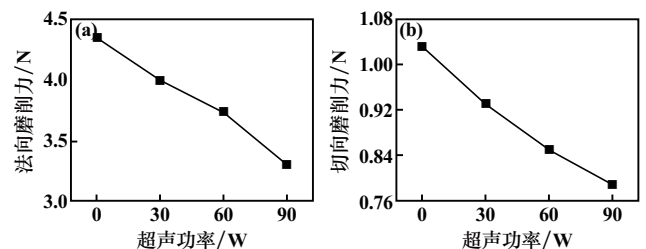
表2 干磨加工参数

砂轮线速度 $v_s/(m \cdot s^{-1})$	进给速度 $v_w/(mm \cdot min^{-1})$	铣磨深度 $a_p/\mu m$	超声功率 P/W
1.09~5.49	150~600	7~22	0~90

3 试验结果与分析

3.1 超声功率对磨削力的影响

旋转超声铣磨加工时磨削力随超声功率的变化规律见图3。在砂轮线速度4.02 m/s、进给速度150 mm/min、铣磨深度7 μm 条件下,超声功率从0增加至90 W时,法向磨削力从4.35 N下降至3.30 N,切向磨削力从1.03 N下降至0.79 N,磨削力随着超声功率增大呈下降趋势。由磨粒切削轨迹分析可知,超声振动的引入使得切削特性发生了改变,磨粒切削轨迹的干涉作用使得单位时间内工件表面被切削的次数增多,切屑更细,工件材料得到更加有效的去除。随着超声功率增大,正弦轨迹曲线的波动幅度增大,振动冲击作用更强,旋转超声的高频振动冲击作用促进了材料裂纹

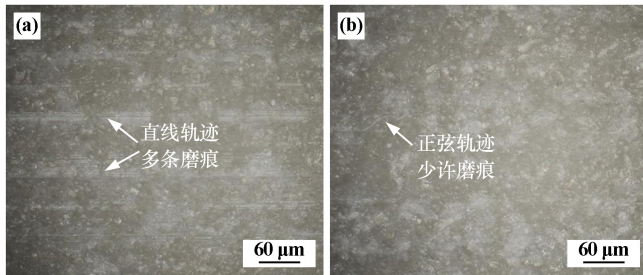


(a) 法向磨削力; (b) 切向磨削力

图3 磨削力与超声功率的关系

的生长,利于破碎去除,磨粒切入材料的难度降低,去除材料受到的阻力减小,磨削力下降。

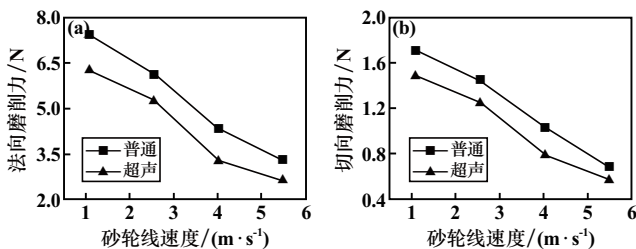
图 4 为普通铣磨和旋转超声铣磨后工件表面形貌。超声功率 0 W,即普通铣磨后,工件表面存在多条互相平行的深磨痕,平整均匀性差,表明较高的磨削力得到的工件表面形貌不佳;超声功率 90 W,即旋转超声铣磨后,工件表面只存在少许交叉重叠的正弦曲线划痕,表面相对平整,表明超声作用下较低的磨削力能得到较好的工件表面形貌。



(a) 超声功率 0 W; (b) 超声功率 90 W
图 4 不同功率下工件表面形貌

3.2 砂轮线速度对磨削力的影响

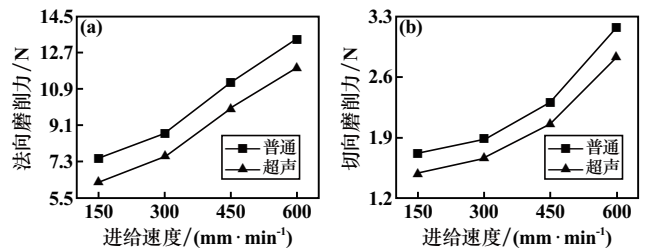
旋转超声铣磨及普通铣磨加工时,磨削力随砂轮线速度的变化规律如图 5 所示。在进给速度 150 mm/min、铣磨深度 7 μm 条件下,砂轮线速度从 1.09 m/s 增加至 5.49 m/s,普通铣磨时的法向和切向磨削力分别从 7.43 N 和 1.71 N 下降至 3.29 N 和 0.68 N,旋转超声铣磨时的法向和切向磨削力分别从 6.28 N 和 1.49 N 下降至 2.62 N 和 0.57 N,磨削力均随着砂轮线速度提高呈下降趋势。这是由于增大砂轮线速度后,单位时间内砂轮磨粒与工件表面接触的次数增多,单颗磨粒的切削厚度变小,材料去除的难度减轻,切削阻力减小。此外,提高砂轮线速度也会导致铣磨温度增高,一定程度上使得工件表面软化,去除材料时受到的阻力减小,磨削力呈现下降趋势。对比分析可知,旋转超声铣磨时的磨削力更小,砂轮线速度 4.02 m/s 时,旋转超声铣磨的磨削力降幅最大,其中法向磨削力可降低 24.17%、切向磨削力可降低 23.30%。



(a) 法向磨削力; (b) 切向磨削力
图 5 磨削力与砂轮线速度的关系

3.3 进给速度对磨削力的影响

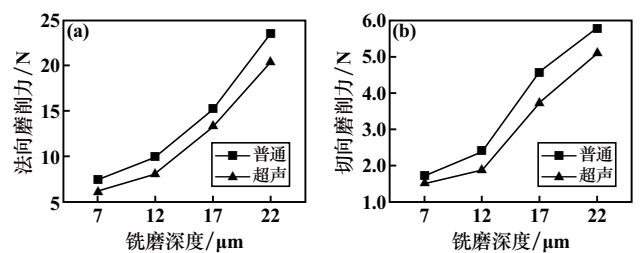
旋转超声铣磨及普通铣磨加工时,磨削力随进给速度的变化规律如图 6 所示。在砂轮线速度 1.09 m/s、铣磨深度 7 μm 条件下,进给速度从 150 mm/min 增加至 600 mm/min,普通铣磨时的法向和切向磨削力分别从 7.43 N 和 1.71 N 增加至 13.36 N 和 3.18 N,旋转超声铣磨时的法向和切向磨削力分别从 6.28 N 和 1.49 N 增加至 11.90 N 和 2.83 N,磨削力均随着进给速度提高而呈上升趋势。提高了进给速度后,砂轮磨粒与工件表面在单位周期内的接触频率减小,需要去除材料的体积更多,单颗磨粒的切削厚度增大,切削阻力增大,因此磨削力呈现上升趋势。对比分析可知,旋转超声铣磨时的磨削力更小,进给速度 150 mm/min 时,旋转超声铣磨的磨削力降幅最大,其中法向磨削力可降低 15.48%、切向磨削力可降低 12.87%。



(a) 法向磨削力; (b) 切向磨削力
图 6 磨削力与进给速度的关系

3.4 铣磨深度对磨削力的影响

旋转超声铣磨及普通铣磨加工时,磨削力随铣磨深度的变化规律如图 7 所示。在砂轮线速度 1.09 m/s、进给速度 150 mm/min 条件下,铣磨深度从 7 μm 增加至 22 μm,普通铣磨时的法向和切向磨削力分别从 7.43 N 和 1.71 N 增加至 23.56 N 和 5.79 N,旋转超声铣磨时的法向和切向磨削力分别从 6.28 N 和 1.49 N 增加至 20.37 N 和 5.09 N,磨削力均随着铣磨深度提高而呈上升趋势。提高了铣磨深度后,砂轮磨粒在单位时间内去除材料的体积增多,同时切削弧长变长,单颗磨粒的切削厚度增大,材料去除时受到的阻力增大,导致磨削力上升。对比分析可知,旋转超声铣磨时的磨削力更



(a) 法向磨削力; (b) 切向磨削力
图 7 磨削力与铣磨深度的关系

小,铣磨深度 12 μm 时,旋转超声铣磨的磨削力降幅最大,其中法向磨削力可降低 18.36%、切向磨削力可降低 21.10%。

4 结 论

1) 在砂轮线速度 4.02 m/s、进给速度 150 mm/min、铣磨深度 7 μm 条件下,超声功率从 0 W 增大至 90 W 时,磨削力呈降低趋势,表面形貌显著改善。

2) 随着砂轮线速度增大、进给速度和铣磨深度减小,旋转超声铣磨和普通铣磨时的磨削力均呈减小趋势。

3) 在试验加工参数范围内,旋转超声铣磨时磨削力均低于普通铣磨时。砂轮线速度 4.02 m/s、进给速度 150 mm/min、铣磨深度 7 μm 时旋转超声铣磨的磨削力有最大降幅,法向磨削力降低了 24.17%,切向磨削力降低了 23.30%。

参考文献:

- [1] 肖汉宁,刘井雄,郭文明,等. 工程陶瓷的技术现状与产业发展[J]. 机械工程材料, 2016,40(6):1-7.
[2] 梁静静,张相召,赵光辉,等. 磨削加工对 Al_2O_3 陶瓷表面质量与

力学性能的影响[J]. 材料导报, 2020,34(16):16020-16024.

- [3] 高超,王生,吴国荣,等. 电镀金刚石砂带磨削氧化铝陶瓷的试验研究[J]. 工具技术, 2017,51(10):40-43.
[4] 刘杰,曹剑锋,孙正斌,等. 树脂金刚石砂轮加工氧化铝陶瓷的磨削工艺试验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2016,36(4):79-83.
[5] 张能,魏昕. 超声振动铣磨工程陶瓷的表面粗糙度研究[J]. 机械设计与制造, 2019(12):48-50.
[6] 陈发胜,苏长发,张占华,等. 陶瓷材料的超声辅助铣磨削加工技术[J]. 导航与控制, 2019,18(5):75-83.
[7] 刘浩,靳刚,李占杰,等. 氧化铝陶瓷超声磨削实验及磨削力模型研究[J]. 机械研究与应用, 2019,32(4):55-59.
[8] 陈德根,刘雅荣. 基于超声振动辅助加工的陶瓷材料磨削力研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020,34(4):115-122.
[9] LIANG Z, WU Y, WANG X, et al. A new two-dimensional ultrasonic assisted grinding (2D-UAG) method and its fundamental performance in monocrystal silicon machining[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010,50(8):728-736.
[10] 尹艳凤,谷美林,汪耀武,等. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 陶瓷材料超声辅助微磨削的磨削力试验研究[J]. 工具技术, 2019,53(6):23-26.
[11] 王磊,董金善,杨林娟. 氧化铝陶瓷旋转超声铣磨加工表面粗糙度研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(4):135-138.

引用本文: 王磊,董金善,杨林娟. 氧化铝陶瓷旋转超声铣磨加工磨削力研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):153-156.

(上接第 152 页)

- [12] XIE J, Imanishi N, ZHANG T, et al. Li-ion diffusion in amorphous Si films prepared by RF magnetron sputtering: A comparison of using liquid and polymer electrolytes[J]. Materials Chemistry and Physics, 2010,120(2-3):421-425.
[13] YAN X, Gouissem A, Sharma P. Atomistic insights into Li-ion diffusion in amorphous silicon[J]. Mechanics of Materials, 2015,91:306-312.
[14] Tritsarlis G A, Zhao K, Okeke O U, et al. Diffusion of Lithium in Bulk Amorphous Silicon: A Theoretical Study[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2012,116(42):22212-22216.
[15] SHI L R, PANG C L, CHEN S L, et al. Vertical graphene growth on SiO microparticles for stable lithium ion battery anodes[J]. Nano Letters, 2017,17(6):3681-3687.
[16] Park C M, Choi W, Hwa Y, et al. Characterizations and electrochemical behaviors of disproportionated SiO and its composite for rechargeable Li-ion batteries[J]. Journal of Materials Chemistry, 2010,20(23):4854-4860.
[17] DUAN H, YAN T T, CHEN G R, et al. A facile strategy for the fast construction of porous graphene frameworks and their enhanced electro-sorption performance[J]. Chemical Communications, 2017,53(54):7465-7468.
[18] Khan Z U, YAN T T, SHI L Y, et al. Improved capacitive deionization by using 3D intercalated graphene sheet-sphere nanocomposite architectures[J]. Environmental Science: Nano, 2018,5(4):980-991.
[19] LI Y Z, YAN K, LEE H W, et al. Growth of conformal graphene cages on micrometre-sized silicon particles as stable battery anodes[J].

Nature Energy, 2016,1(2):15029.

- [20] Bonaccorso F, Colombo L, Yu G, et al. Graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems for energy conversion and storage[J]. Science, 2015,347:1246501.
[21] Son I H, Park J H, Kwon S, et al. Silicon carbide-free graphene growth on silicon for lithium-ion battery with high volumetric energy density[J]. Nature Communications, 2015(6):7393.
[22] ZHANG X H, WANG D H, QIU X Y, et al. Stable high-capacity and high-rate silicon-based lithium battery anodes upon two-dimensional covalent encapsulation[J]. Nature Communications, 2020,11(1):3826.
[23] Yuge R, Toda A, Fukatsu K, et al. Effect of Volume Expansion on SEI Covering Carbon-Coated Nano-Si/ SiO Composite[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2013,160(10):A1789-A1793.
[24] YUE Z H, ZHOU L, JIN C X, et al. Study on the effect of intrinsic electrical resistivity of silicon materials on its performance for Li-ion batteries[J]. Materials Letters, 2017,186:217-219.
[25] Handy J V, Luo Y T, Andrews J, et al. An Atomic View of Cation Diffusion Pathways from Single-Crystal Topochemical Transformations[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2020,59(38):16385-16392.
[26] Sivonxay E, Aykol M, Persson K A. The lithiation process and Li diffusion in amorphous SiO_2 and Si from first-principles[J]. Electrochimica Acta, 2020,331:135344.

引用本文: 梁帆,杨乐之,习小明,等. 双层碳包覆 SiO_x 负极材料及其电化学性能研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):148-152.