

Al₂O₃/TiC 陶瓷材料超声辅助微磨削的磨削力试验研究

尹艳凤,谷美林,汪耀武,周彤,彭程

河北工业大学

摘要: 基于超声辅助微磨削加工对 Al₂O₃/TiC 陶瓷材料进行微磨削试验,并与传统微磨削技术进行对比。利用单因素分析法研究 Al₂O₃/TiC 陶瓷材料的磨削力随超声振幅、磨削砂轮转速、磨削深度、进给速度等工艺参数的变化规律,为提高加工质量和合理选择加工参数提供依据。结果表明:超声波辅助微磨削试验获得了不同磨削参数下磨削力的变化规律,磨削力随超声波振幅、主轴转速的增大而减小,随磨削深度、工件进给速度的增大而增大;在相同工艺参数下,相比传统微磨削加工,超声辅助微磨削 Al₂O₃/TiC 陶瓷材料可以有效降低磨削力;在保证工件加工表面质量的前提下,超声辅助微磨削加工可以采用较大的磨削深度和磨削速度,有助于提高材料的去除率和加工效率,试验还得出加工 Al₂O₃/TiC 陶瓷材料的最优参数组合。

关键词: Al₂O₃/TiC 陶瓷材料;微磨削;超声振动;磨削力

中图分类号: TG506.7;TH140.7 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-7008.2019.06.005

Experimental Study on Grinding Force of Ultrasonic-assisted Micro-grinding of Al₂O₃/TiC Ceramic Material

Yin Yanfeng, Gu Meilin, Wang Yaowu, Zhou Tong, Peng Cheng

Abstract: Based on ultrasonic-assisted micro-grinding, the micro-grinding experiments of Al₂O₃/TiC ceramic materials are carried out and compared with the traditional micro-grinding technology. The variation of the grinding force of Al₂O₃/TiC ceramic materials with ultrasonic amplitude, grinding wheel speed, grinding depth, feed rate and other technological parameters is studied by single factor analysis method, which provides the basis for improving the processing quality and selecting the processing parameters reasonably. The results show that the grinding force decreases with the increase of ultrasonic amplitude and spindle speed, and increases with the increase of grinding depth and the workpiece feed rate. Compared with traditional micro-grinding, ultrasonic-assisted micro-grinding can effectively reduce the grinding force. On the premise of ensuring the surface quality of the workpiece, ultrasonic-assisted micro-grinding can adopt greater grinding depth and speed, which is helpful in improving the material removal rate and processing efficiency. And the optimal parameter combination in grinding Al₂O₃/TiC ceramic materials is obtained.

Keywords: Al₂O₃/TiC ceramic material; micro-grinding; ultrasonic vibration; grinding force

1 引言

氧化铝基陶瓷材料具有高硬度、良好的耐磨性以及耐腐蚀性,广泛应用于航天航空和生物医学等领域。氧化铝生物陶瓷常被作为人工关节修复材料,相比金属材料具有更好的生物相容性及抗弯强度和耐热性,但由于微磨削过程中容易产生热应力和较大的切削力,会降低断裂韧性和抗弯强度。为了延长人工关节的临床寿命,需要对新的加工工艺进行研究,减小氧化铝基陶瓷材料微磨削的磨削力。

微磨削加工技术适用于加工表面及棱角精度较高的零件,但是在磨削过程中存在砂轮易磨损、堵塞、加工效率低等缺陷,在一定程度上制约着微磨削

技术的发展和应^[1,2]。超声辅助微磨削及微铣削复合加工方法可通过减小切削力、降低切削温度和加工工件的表面质量^[3]等手段有效改善加工效果,提高硬脆材料的加工特性。磨削力对磨削热、砂轮磨损和加工硬化及工件表面加工质量等物理现象^[4]有着重要影响,同时具有容易测量的特点,因此,磨削力是磨削加工过程中反映磨削状态的重要物理量。

国内外学者关于超声振动辅助对磨削力的影响规律进行了大量的研究。Bhaduri D. 等^[5]通过对镍基合金 718 材料的超声振动磨削试验表明,相同切削参数下法向和切向磨削力分别降低了 23% 和 43%;Wu Y. B. 等^[6]通过假设单颗粒的磨削与磨屑断面面积有关,研究轴向超声振动振幅、砂轮速度对磨削力的影响规律;周雪钢^[7]对氮化硅陶瓷进行超声磨削加工,表明超声振动能有效改善材料加工表

面质量;乔国朝^[8]对热压氮化硅陶瓷的超声振动铣磨加工试验,揭示了超声振动冲击和磨粒旋转磨蚀是超声铣磨加工材料去除的主要部分;T. Tawakoli等^[9]通过对42CrMo4进行超声振动干式磨削试验,研究表明随着超声振幅在0~10 μm 的变化,法向磨削力逐渐减小,相比传统磨削加工,超声振动辅助加工可有效减轻工件表面质量的损伤。

通过分析国内外学者的研究发现,将超声振动应用于传统磨削加工中可明显改善加工效果并提高加工效率。本文通过对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 陶瓷材料的超声辅助微磨削试验,分析磨削力随着加工工艺参数的变化规律,并在保证工件加工表面质量的前提下,得出高效加工该材料的最优加工参数。

2 试验设计

在已有的试验平台基础上搭建如图1所示的超声辅助微磨削试验平台。该平台由三种关键性运动组成,分别是:超声波发生器沿主轴轴线方向做高频超声振动、砂轮高速旋转运动和高精度微进给运动。为得到较准确的试验数据,在防尘、恒温环境中实现对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 陶瓷材料的超声振动辅助微磨削加工,见图2。

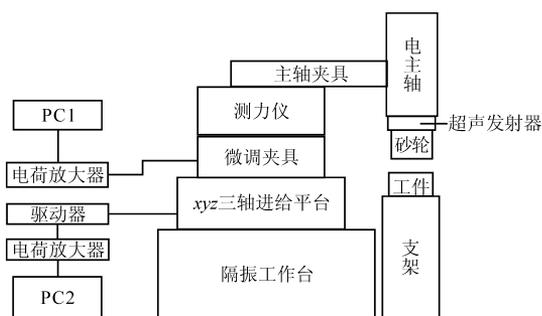


图1 试验平台

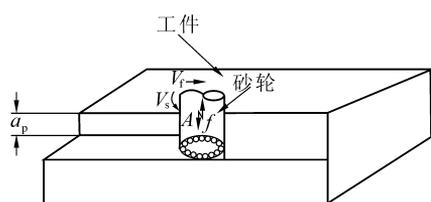


图2 超声振动微磨削加工

2.1 工件材料与砂轮的选择

由于氧化铝基陶瓷材料具有硬度大和脆性高的特点,故通常选择金刚石砂轮作为微磨削工具,磨粒的大小、种类、结合剂等影响着砂轮的加工特性。选择加工质量稳定且具有较好综合性能的电镀金刚石微径砂轮作为微磨削工具,半径为1.5mm,砂轮粒度270#。试验材料为 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 陶瓷,主要成分是

氧化铝和碳化钛,试件尺寸50mm \times 20mm \times 2mm,材料性能特征参数见表1。

表1 氧化铝基TiC陶瓷材料性能参数

参数	弹性模量 H (GPa)	材料硬度 E (GPa)	断裂韧性 K_{IC} ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)
数值	45	1.65	4.8

2.2 超声振动端面微磨削试验设计

基于试验平台对超声辅助微磨削试验进行设计。运用单因素分析法探究磨削力随超声振动参数、砂轮转速、磨削深度、进给速度等加工参数的变化规律,具体试验参数设计组合见表2,超声振动微磨削试验方案见表3。

表2 微磨削参数

超声振幅 A (μm)	主轴转速 n (r/min)	磨削深度 a_p (μm)	进给速度 V_f ($\mu\text{m}/\text{s}$)
0	10000	2	40
6	20000	3	70
7	30000	4	100
8	40000	5	130

表3 超声振动微磨削试验方案

试验编号	超声振幅 A (μm)	主轴转速 n (r/min)	磨削深度 a_p (μm)	进给速度 V_f ($\mu\text{m}/\text{s}$)
1	7	10000	3	100
2	7	20000	3	100
3	7	30000	3	100
4	7	40000	3	100
5	0	20000	3	100
6	6	20000	3	100
7	7	20000	3	100
8	8	20000	3	100
9	7	20000	2	100
10	7	20000	3	100
11	7	20000	4	100
12	7	20000	5	100
13	7	20000	3	40
14	7	20000	3	70
15	7	20000	3	100
16	7	20000	3	130

3 试验结果分析

磨削力是磨削过程中的重要物理量,其变化规律间接地反映了磨削情况。磨削力的大小直接影响着陶瓷的表面质量和表面损伤的产生,同时也可作为砂轮的磨损情况提供依据,方便及时修整和更换砂轮。

图3是磨削力示意图。通过对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 陶瓷材料进行超声辅助微磨削试验和传统微磨削试验对比,根据对磨削力的测量结果分析各工艺加工参数和超声振动参数对磨削力的变化规律,并分析了各

加工参数对磨削力比的影响。

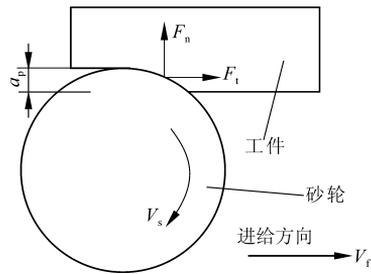


图3 磨削力

3.1 超声振动参数对磨削力的影响分析

图4为法向和切向磨削力随超声振动参数振幅的变化规律。在相同工艺参数下,相比无超声振动,振幅由0开始增大到 $8\mu\text{m}$ 的过程中,超声辅助磨削力随振幅的增大呈先减小后增大的趋势,明显低于无超声振动。根据振幅为0的无超声振动和振幅为 $6\mu\text{m}$ 和 $7\mu\text{m}$ 的超声振动对比,附加超声振动的磨削力急剧下降;与振幅为 $6\mu\text{m}$ 、 $7\mu\text{m}$ 相比,超声振幅为 $8\mu\text{m}$ 时磨削力反而增大,同时振幅为 $7\mu\text{m}$ 时磨削力最低,就整个磨削过程而言,磨削力随振幅的增加而降低,但降低幅度有限。

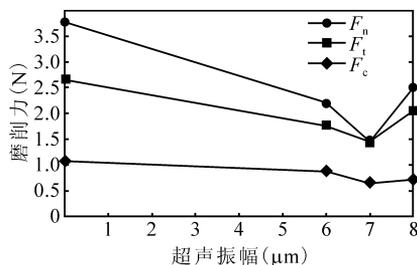


图4 磨削力随超声振幅的变化规律

3.2 磨削参数对磨削力的影响分析

图5为法向和切向磨削力随主轴转速的变化规律。随着主轴转速增大,无论有无超声辅助振动,法向和切向的磨削力整体呈下降趋势;在工件磨削深度、进给速度及超声参数相同情况下,相比传统微磨削加工,超声振动辅助微磨削能够明显降低磨削力,且在转速为 $20000\text{r}/\text{min}$ 时切向和法向的磨削力下降幅度最大。其原因是,随着主轴转速的增大,单颗磨粒的瞬时切削厚度和瞬时切削面积变小,从而使单颗磨粒和砂轮整体的磨削力降低。

图6为法向和切向磨削力随磨削深度的变化规律。无论有无超声振动辅助,法向磨削力和切向磨削力都随磨削深度的增大而增大。在相同磨削参数下,磨削深度由 $2\mu\text{m}$ 增加到 $3\mu\text{m}$ 时,超声振动辅助加工的法向和切向磨削力增长速度较缓慢;磨削深度从 $3\mu\text{m}$ 增加到 $5\mu\text{m}$ 时,法向磨削力增长速度较

快,且在磨削深度为 $3\mu\text{m}$ 时,超声振动辅助的法向和切向的磨削力相比传统微磨削下降幅度最大。超声振动辅助微磨削力低于传统微磨削力,这是由于在主轴添加超声振动砂轮的磨削方式为间歇式切削,导致超声振动辅助磨削下的平均磨削力低于传统微磨削;同时,当磨削深度增大时,在瞬时切削厚度不变的情况下,磨粒有效前角增大,从而引起单颗粒的磨削力增大。

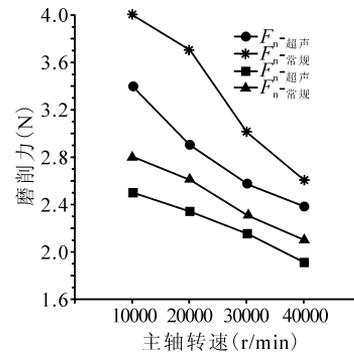


图5 磨削力随主轴转速的变化规律

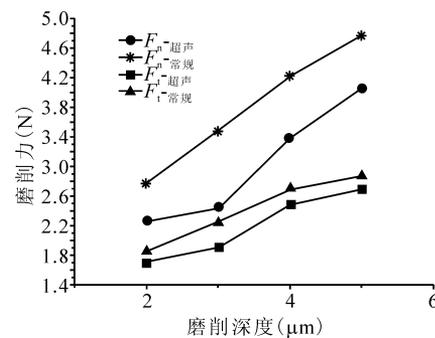


图6 磨削力随磨削深度的变化规律

图7为法向和切向磨削力在超声振动辅助微磨削和传统微磨削加工中随工件进给速度的变化规律。进给速度由 $40\mu\text{m}/\text{s}$ 增大到 $130\mu\text{m}/\text{s}$,法向和切向磨削力均随进给速度的增大而增大;进给速度为 $100\mu\text{m}/\text{s}$ 时,在相同加工参数下,相对传统微磨削而言,超声振动辅助微磨削的法向和切向磨削力降低幅度最大。其原因是,由于工件进给速度增大,引起单颗磨粒的实际接触弧长增大,使得磨粒一工

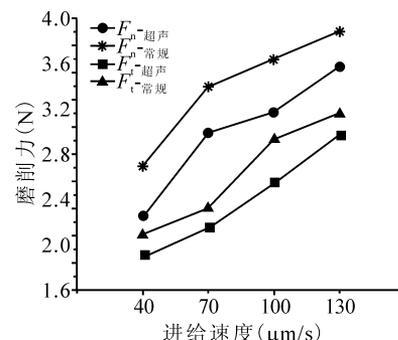


图7 磨削力随工件进给速度变化规律

件作用接触面积增大,导致磨削力增大。

3.3 各加工参数对磨削力比的影响

与磨削力相同,磨削力比也是评价磨削过程中材料可磨性的重要指标,定义磨削力比为 C_f ,表达式为

$$C_f = \frac{F_n}{F_t}$$

式中, F_n 为法向磨削力; F_t 为切向磨削力。

表4为 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 陶瓷微磨削力比随各工艺参数的变化。可见,磨削力比随磨削深度和进给速度的增大呈上升趋势,随主轴转速和振幅的增大呈下降趋势,而且整体的磨削力比随加工参数的变化规律与磨削力基本一致。

表4 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 陶瓷微磨削力比随各工艺参数的变化

磨削深度 a_p (μm)	磨削力比 C_f	主轴转速 n (r/min)	磨削力比 C_f	进给速度 V_f ($\mu\text{m}/\text{min}$)	磨削力比 C_f	振幅 A (μm)	磨削力比 C_f
2	1.49	10000	1.58	240	1.26	0	1.42
3	1.55	20000	1.50	420	1.50	6	1.28
4	1.57	30000	1.32	600	1.56	7	1.05
5	1.66	40000	1.10	780	1.69	8	1.20

4 结语

通过对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 陶瓷材料的微磨削试验,对比了传统微磨削和超声振动辅助微磨削两种加工方式下的磨削力随磨削加工工艺参数与超声振动参数的变化规律,结论如下:

(1) 与传统微磨削相比,超声振动辅助微磨削加工可抑制切向磨削力随磨削参数的变化程度;相比传统磨削微加工,超声振动辅助加工通过施加更大的进给速度和磨削深度,可提高材料的加工效率。

(2) 在给定的磨削用量范围内,并保证加工质量和效率的前提下,超声振动辅助微磨削 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 陶瓷材料的最优微磨削加工参数为:超声振幅 $A = 7\mu\text{m}$, 砂轮转速 $n = 20000\text{r}/\text{min}$, 磨削深度 $a_p =$

$3\mu\text{m}$, 进给速度 $V_f = 100\mu\text{m}/\text{s}$ 。

参考文献

- [1] D Dornfeld, S Min, Y Takeuchi. Recent advances in mechanical micromachining[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2006, 55: 745 - 768.
 - [2] H W Park. Development of micro-grinding mechanics and machine tools[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2008.
 - [3] 张云电. 超声加工及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
 - [4] 胡忠辉, 袁哲, 高峰. 磨削力对磨削表面层质量影响的试验研究[J]. 磨料磨具与磨削, 1988, 48(6): 5 - 10.
 - [5] Bhaduri D, S L Soo, D K Aspinwall, et al. A study on ultrasonic assisted creep feed grinding of nickel based superalloys[J]. Procedia CIRP, 2012(1): 376 - 381.
 - [6] Wu Y B, Nomura M, Feng Z J, et al. Modeling of grinding force in constant-depth-of-cut ultrasonically assisted grinding[J]. Advances in Materials Manufacturing Science and Technology, 2004, 471 - 472: 101 - 106.
 - [7] 周雪钢. 氮化硅陶瓷超声振动磨削机理及表面质量研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
 - [8] 乔国朝. 氮化硅陶瓷超声振动铣磨加工表面完整性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
 - [9] T Tawakoli, B Azarhoushang, M Rabiey. Ultrasonic assisted dry grinding of 42CrMo4[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 42: 883 - 891.
- 第一作者: 尹艳凤, 硕士研究生, 河北工业大学机械工程系, 300130 天津市
First Author: Yin Yanfeng, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China
- 通信作者: 谷美林, 副教授, 河北工业大学机械工程系, 300130 天津市
Corresponding Author: Gu Meilin, Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China