

超声振动辅助微细铣削加工尺寸精度实验*

沈学会^{1,2} 张建华¹ 邢栋梁¹ 董春杰¹

(1. 山东大学机械工程学院, 济南 250061; 2. 山东轻工业学院机械工程学院, 济南 250353)

【摘要】 实验研究了利用进给方向超声振动辅助微细铣削对零件加工尺寸精度的影响。以 2A12 为实验工件材料,利用一个超声振子带动工件沿进给方向振动进行铣槽实验,加工后对槽宽进行了精确测量。通过单因素实验分析了施加超声振动前后加工槽宽的变化,结果表明超声振动有助于减小加工尺寸偏差,而大的振幅更有利于提高加工尺寸精度;基于日本田口方法,通过全因子实验考察了主轴转速、每齿进给量、振幅对加工尺寸偏差的影响并进行了加工参数优化。

关键词: 超声振动 微加工 铣削 尺寸精度 田口方法

中图分类号: TH161⁺.1; TG506.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)03-0229-05

Effects of the Ultrasonic Vibration on Dimensional Accuracy in Micro Milling

Shen Xuehui^{1,2} Zhang Jianhua¹ Xing Dongliang¹ Dong Chunjie¹

(1. College of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China
2. College of Mechanical Engineering, Shandong Institute of Light Industry, Ji'nan 250353, China)

Abstract

The purpose is to investigate the effects of the ultrasonic vibration on dimensional accuracy in micro milling process. Several slot-milling experiments were conducted with aluminium alloy as the workpiece material. The desired vibration was proposed from the workpiece side by an ultrasonic vibrator. The width of slot produced by end milling was precisely measured. A one-factor experiment was conducted at first to analyze the variation of slot width before and after ultrasonic vibration was applied, and the experimental results indicated that ultrasonic vibration made contribution to the decrease of size deviation and larger amplitude tends to reduce the slot width oversize. A full-factor experiment was carried out accordingly based on Taguchi method to optimize the parameters involving spindle speed, feed per tooth and vibrating amplitude.

Key words Ultrasonic vibration, Micro-machining, Milling, Dimensional accuracy, Taguchi method

引言

近年来,微小型零件在国防以及民用领域的需求不断增加,微细铣削由于其加工效率高,并能加工复杂三维几何形状的优点已经成为重要的微加工技术之一,也是目前广大学者十分关注的研究热点。

在宏观加工中,提高机床-刀具-工件系统的精度和刚性是保证加工精度的有效途径之一。但从近

年来的研究看,工艺系统刚性已趋于极限,并且由于小尺寸零件对振动更敏感的特点,在进行微加工以及介观尺度零件加工时,单纯依靠提高工艺系统刚性来提高加工精度十分困难。

振动切削,又称脉冲切削,是在切削过程中给刀具或者工件施加某种可控的振动而形成的一种新的切削方法。振动切削技术最早在日本应用于木材的精密钻削^[1]。目前,该项复合加工技术在车削、钻

收稿日期: 2010-08-09 修回日期: 2010-08-23

* 国家自然科学基金资助项目(50875157)和高等学校博士点专项科研基金资助项目(20090131110031)

作者简介: 沈学会, 博士生, 山东轻工业学院讲师, 主要从事高效精密加工技术研究, E-mail: xhshen@sdili.edu.cn

通讯作者: 张建华, 教授, 博士生导师, 主要从事高效精密加工技术及数控装备研究, E-mail: jhzhang@sdu.edu.cn

削加工中的成功应用已有大量报道,获得了很多良好的加工效果并解决了一些难加工材料的加工问题。比如,Moriwaki 等利用振动车削实现了不锈钢的超精密车削^[2];Zhou 等对玻璃进行振动金刚石车削减小了切削力^[3];Chern 等发现利用外激振动辅助钻削有助于减少切削热并可提高刀具寿命^[4];Chandra 等用超声振动车削低合金钢获得了较普通车削更好的表面质量并减少了刀具磨损^[5]。但是,由于铣削加工刀具-工件相对运动的复杂性,振动切削技术在铣削加工中的应用研究少有报道。

本文通过铣槽实验,首先分析利用工件超声振动辅助铣削加工小零件时超声振动对加工尺寸精度的影响,进而利用日本田口方法统计分析主轴转速、每齿进给量和振幅对加工尺寸精度的影响并进行加工参数优化。

1 实验装置和方法

以 2A12 为工件材料,在 DMU-70V 五轴加工中心上进行铣槽实验,由超声换能器和变幅杆组成的振动子将高频振荡电能转变为机械振动,带动工件沿着进给方向振动,具体实验装置如图 1 所示。加工前有必要先加工出基准平面,加工过程如图 2 所示,用 Kistler 9257B 型三向动态压电式测力仪及配套电荷放大器记录切削力数据,用非接触远红外在线测量切削温度,加工后用超景深三维显微镜放大 100 倍后测量槽宽,每个槽均匀测量 10 次并取其均值作为测量结果。

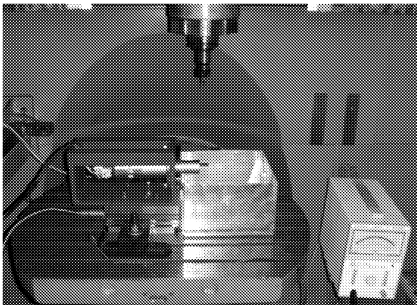


图 1 实验装置
Fig. 1 Experimental setup

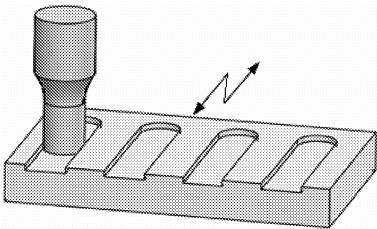


图 2 铣槽加工示意图
Fig. 2 Diagram of slot-milling process

实验设备包括:DMU-70V 型加工中心,主轴

转速范围 0 ~ 18 000 r/min,重复定位精度 ±0.001 mm;ZJS-1000 型驱动电源,固态全晶体式,全自动频率跟踪,220 V,50 Hz,4 A;YP-5020-4Z 型超声波换能器,谐振频率 ±200 Hz;振幅监测系统,通过应变片输出电压信号实现振幅在线监测;VHX-600E 型超景深三维显微镜,最大放大倍数 5 000 倍。Kistler 9257B 型测力仪,采样频率 7 000 Hz。PK50A 型非接触红外测温仪,显示分辨率 0.1°;JSM-6380LA 型扫描电子显微镜。

2 超声振动对加工尺寸精度影响分析

2.1 单因素铣槽实验及槽宽测量结果

为了分析施加超声振动前后及不同振幅条件下加工槽宽的变化,实验条件:刀具为硬质合金 TiAlN 涂层双刃立铣刀,直径 2 mm,螺旋角 30°。工件材料为 2A12。加工条件为主轴转速 5 000 r/min,每齿进给量 4 μm,切深 0.3 mm。振动条件为工件沿进给方向振动,频率 19.58 kHz,振幅 0、4、7、10 μm。切削液为矿物油。进行单因素铣槽实验,并对加工后的 4 个槽宽度进行测量,测量结果如图 3 所示。

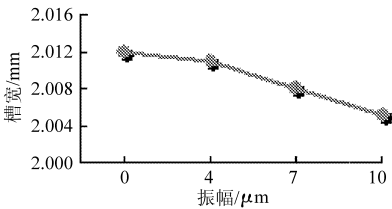


图 3 振幅对槽宽的影响
Fig. 3 Variation of slot width vs amplitude

从图 3 可以看出,相对于普通加工条件(振幅为零时),施加超声振动后加工尺寸偏差明显减小,并且有着随着振幅的增大而不断减小的趋势。

2.2 超声振动对加工槽宽的影响分析

超声振动的施加必然会引起刀具-工件间相对运动方式的变化,从刀具运动轨迹变化分析可知加工槽宽减小的原因。图 4a、4b 分别描绘的是用直径 2 mm 双刃立铣刀铣削加工时,在普通铣削和振动铣削条件下,相邻两个刀尖的二维运动轨迹曲线,关于刀具运动轨迹同类计算方法可详见文献[6]。对比图中右侧放大图不难分析,超声振动施加后,高频外激振动迫使刀具/工件在加工过程中不断分离,从而改变了传统铣削时单个切削周期的连续加工模式,形成高频断续加工。对比图 5 显示的振幅分别为 0 μm 和 7 μm 时加工槽底面的 SEM 图片也可以清晰看到,施加超声振动后,由于高频断续切削产生了不同于普通铣削时的鱼鳞状加工表面。

图 6 显示的是切削力峰值和一个切削周期内的

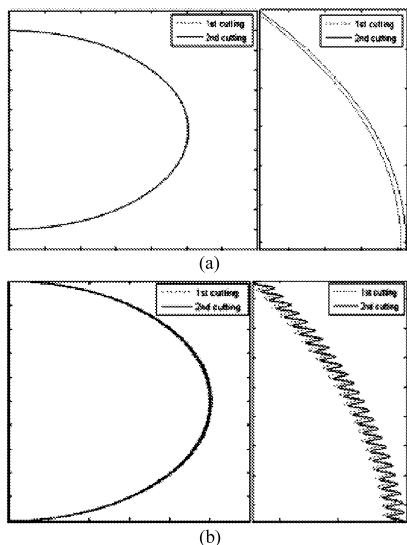


图 4 切削刃运动轨迹曲线
Fig. 4 Trajectories of tool tips
(a) 无振动 (b) 有振动

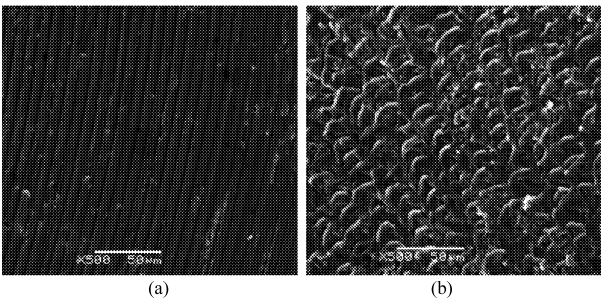


图 5 槽底 SEM
Fig. 5 SEM photos of slot bottom surfaces
(a) $A = 0 \mu\text{m}$ (b) $A = 7 \mu\text{m}$

切削力均值随振幅的变化情况。其中, F_x 和 F_y 分别代表进给方向和法向分力(即垂直进给方向)。图中可以看出,施加超声振动后,由于刀具-工件间不断分离,各切削分力均值都明显减小。另外,随着振幅的增大,各切削分力的均值也都有逐渐减小的趋势,这是因为振幅越大,刀具-工件的分离现象越明显,平均切削力也就会越小。

在法向 y 方向,切削力峰值没有发生十分明显的变化,但有随振幅增大而一直缓慢下降的趋势。这是因为振动的施加使切削液更容易到达加工区,有助于减小刀具-工件间的摩擦,进而减小切削力。

在进给 x 方向,也就是振动方向上,切削力峰值变化显著,随着振幅的增大首先呈现出明显的减小趋势,但当振幅达到 $10 \mu\text{m}$ 时,呈现突然上升趋势。沿进给方向施加超声振动后,由振动产生的瞬时微量冲击加速了切削层金属的变形和分离,使得进给方向切削力明显减小。而太大的振幅会产生过大的冲击,反而造成振动方向切削力的增大。

综合分析上述实验结果,超声振动促进了刀具-

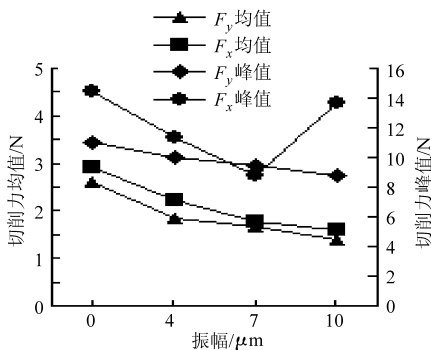


图 6 振幅对切削力的影响
Fig. 6 Variation of cutting force vs amplitude

工件的不断分离,从而避免切削热的过量累积;对槽宽影响较大的法向切削分力呈现出减小趋势,这些都是保障加工尺寸精度的重要因素。另外,高频振动切削会使工件在加工过程中产生不灵敏性动态变化^[7],这也是加工槽宽减小的原因。

3 基于田口方法的加工参数优化

本次实验的目的是确定获得最小加工尺寸偏差的最佳可控因素组合。

田口方法是日本田口玄一博士创立的一种低成本、高效益的质量工程方法,重在追求产品的稳健性。田口建议使用信噪比(S/N)作为衡量产品品质损失的绩效指标,原因是使用信噪比可以同时达到确保平均值(信号)尽可能接近名义值的同时,尽量减少过程变化(噪音)的目标^[8]。

根据工业生产中的实际需要,质量特性分为望大、望小、望目 3 种品质特性。

望大特性,即质量特征越大越好

$$S/N = -10\lg\left(\frac{1}{n} \sum y^2\right) \quad (1)$$

望小特性,即质量特征越小越好

$$S/N = -10\lg\left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y^2}\right) \quad (2)$$

望目特性,即质量特征达到或接近目标值

$$S/N = -10\lg\left(\frac{1}{n} \sum (y - m)^2\right) \quad (3)$$

上述 3 种情况下 S/N 的计算公式中, y 为实验结果, n 为实验次数, m 为目标值。

显然,加工尺寸偏差为望小型质量特性,后文的分析将基于式(2)采用概念性方法进行均值和 S/N 的计算,具体方法可参照参考文献[9]。

3.1 实验设计

本次实验固定切削深度为 0.3 mm ,振动频率为 19.58 kHz ,主要考查主轴转速 A 、每齿进给量 B 、振幅 C 3 个因素对加工尺寸偏差的影响,每个因素设 3 个水平,各因素及水平列于表 1。采用全因子实验

法安排 27 次实验,每次实验各因素组合如表 2 所示。

表 1 因素和水平
Tab.1 Factors and levels

水平	因素		
	$A/r\cdot\text{min}^{-1}$	$B/\mu\text{m}\cdot\text{z}^{-1}$	$C/\mu\text{m}$
1	5 000	2	4
2	9 000	4	7
3	13 000	6	10

3.2 实验结果及数据分析

表 2 列出了加工后所有槽宽的测量结果、尺寸偏差及其 S/N 的计算值,表 3 和图 7 分别为平均 S/N 的回应表和回应图。

表 2 实验结果及其 S/N
Tab.2 Experimental results and the corresponding S/N ratio

序号	因素组合	测量值/mm	偏差/mm	S/N/dB
1	$A_1B_1C_1$	2.013	0.013	3.772
2	$A_1B_2C_2$	2.008	0.008	4.194
3	$A_1B_3C_3$	2.007	0.007	4.310
4	$A_2B_1C_1$	2.014	0.014	3.708
5	$A_2B_2C_2$	2.010	0.010	4.000
6	$A_2B_3C_3$	2.010	0.010	4.000
7	$A_3B_1C_1$	2.019	0.019	3.442
8	$A_3B_2C_2$	2.011	0.011	3.917
9	$A_3B_3C_3$	2.011	0.011	3.917
10	$A_1B_1C_2$	2.009	0.009	4.092
11	$A_1B_2C_3$	2.005	0.005	4.602
12	$A_1B_3C_1$	2.013	0.013	3.772
13	$A_2B_1C_2$	2.011	0.011	3.917
14	$A_2B_2C_3$	2.008	0.008	4.194
15	$A_2B_3C_1$	2.018	0.018	3.489
16	$A_3B_1C_2$	2.013	0.013	3.772
17	$A_3B_2C_3$	2.008	0.008	4.194
18	$A_3B_3C_1$	2.020	0.020	3.398
19	$A_1B_1C_3$	2.006	0.006	4.444
20	$A_1B_2C_1$	2.011	0.011	3.917
21	$A_1B_3C_2$	2.010	0.010	4.000
22	$A_2B_1C_3$	2.009	0.009	4.092
23	$A_2B_2C_1$	2.015	0.015	3.648
24	$A_2B_3C_2$	2.011	0.011	3.917
25	$A_3B_1C_3$	2.009	0.009	4.092
26	$A_3B_2C_1$	2.018	0.018	3.489
27	$A_3B_3C_2$	2.013	0.013	3.772

表 3 平均 S/N 回应
Tab.3 Response table for mean S/N ratio dB

因素	水平			极差
	1	2	3	
主轴转速 A	4.122	3.885	3.777	0.345
每齿进给量 B	3.926	4.017	3.842	0.175
振幅 C	3.626	3.953	4.205	0.579
最优组合	$A_1B_2C_3$			

从表 3 和图 7 的分析结果看,振幅对质量特性的波动影响最为显著,其次是主轴转速,而每齿进给量影响作用最小。微细铣削加工时,鉴于较小的刀具尺寸,主轴转速越高则会产生更高频的刀具振动,进而影响加工精度。施加超声振动后,振幅的大小会影响刀具-工件间的分离空间,在其他加工参数一定的情况下,决定了相对净切削时间^[7],是影响加工精度的主要因素。

在表 3 中通过选择最大 S/N 确定获得最小加工尺寸偏差的最佳因素组合为 $A_1B_2C_3$ 。根据分析结果,在低转速和大振幅条件下可以获得更好的加工尺寸精度,从表 2 槽宽测量结果看,在该组参数组合下可获得 5 μm 的最小尺寸偏差。

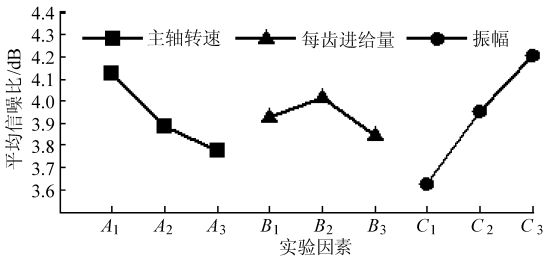


图 7 S/N 回应
Fig.7 S/N ratio graph

4 结论

- (1)以 2A12 为实验工件材料,通过单因素铣槽实验,分析超声振动对加工尺寸精度影响,实验结果及分析表明:进给方向超声振动辅助微细铣削加工可促进刀具-工件加工过程中的不断分离,从而有助于避免切削热的过量累积,降低切削温度和法向切削分力,减小加工尺寸偏差。
- (2)基于田口方法,通过全因子实验,考察了主轴转速、每齿进给量、振幅对加工尺寸偏差的影响,实验结果表明:在进给方向超声振动辅助铣削铝合金实验中,振幅对加工尺寸偏差影响最为显著,而每齿进给量的影响作用最小。
- (3)根据参数优化分析结果,获得最小尺寸偏差的因素组合为:主轴转速 5000r/min、每齿进给量 4μm、振幅 10μm。分析结果显示,在低转速和大振幅条件下可以获得更好的加工尺寸精度。

参 考 文 献

- 1 Kumabe J, Sabuzawa T. Study on the precision drilling of wood (1st report)-profile analysis of drilled hole[J]. JSPE, 1971, 37(2): 98 ~ 104.
 - 2 Moriwaki T, Shamoto E. Ultra-precision diamond turning of stainless steel by applying ultrasonic vibration[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1991, 40(1): 559 ~ 562.
 - 3 Zhou M, Wang X J, Ngoi B K A, et al. Brittle-ductile transition in the diamond cutting of glasses with the aid of ultrasonic vibration [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 121(2 ~ 3): 243 ~ 251.
 - 4 Chern Gwolianq, Lee Hanjou. Using workpiece vibration cutting for micro-drilling[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2006, 27(7 ~ 8): 688 ~ 692.
 - 5 Nath Chandra, Rahman M, Andrew S S K. A study on ultrasonic vibration cutting of low alloy steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192 ~ 193: 159 ~ 165.
 - 6 Shen Xuehui, Zhang Jianhua, Yin Tianjin, et al. A study on cutting force in micro end milling with ultrasonic vibration[J]. Advances Materials Research, 2010, 97 ~ 101: 1 910 ~ 1 914.
 - 7 [日]隈部淳一郎. 精密加工振动切削: 基础与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
 - 8 Park S H. Robust design and analysis for quality engineering[M]. London: Chapman & Hall, 1996.
 - 9 Ghani J A, Choudhury I A, Hassan H H. Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 145(1): 84 ~ 92.
-

(上接第 223 页)

- 13 张选平, 杜玉平, 秦国强, 等. 一种动态改变惯性权的自适应粒子群算法[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(10): 1 039 ~ 1 042.
Zhang Xuanping, Du Yuping, Qin Guoqiang, et al. Adaptive particle swarm algorithm with dynamically changing inertia weight [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(10): 1 039 ~ 1 042. (in Chinese)
- 14 师彪, 李郁侠, 于新花, 等. 自适应变系数粒子群-径向神经网络模型在负荷预测中的应用[J]. 计算机应用, 2009, 29(9): 2 454 ~ 2 459.
Shi Biao, Li Yuxia, Yu Xinhua, et al. Short-term load forecasting method based on neural network hybrid algorithm of adaptive variable coefficients particle swarm optimization and radial basis function [J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(9): 2 454 ~ 2 459. (in Chinese)
- 15 刘丽琴, 张学良, 谢黎明, 等. 基于动态聚集距离的多目标粒子群优化算法及其应用[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 189 ~ 194.
Liu Liqin, Zhang Xueliang, Xie Liming, et al. Multi-objective particle swarm optimization algorithm based on dynamic crowding distance and its application [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 189 ~ 194. (in Chinese)
- 16 Jeng Luen Liou, Jen Fin Lin. A modified fractal micro-contact model developed for asperity heights with variable morphology parameters [J]. Wear, 2010, 268(1 ~ 2): 133 ~ 144.