

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.018

超声振动辅助下 304 不锈钢微孔钻削实验研究

闵林锋¹, 付炎杰¹, 李峰²

(1. 温州职业技术学院瑞安学院, 浙江 温州 325035; 2. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为了开展超声振动辅助下 304 不锈钢微孔钻削实验研究, 在分析超声振动微孔钻削机制的基础上, 深入研究微孔加工过程, 保证微孔加工精度。研究表明: 钻削载荷过程形成钻入、稳定和钻出的 3 个阶段。超声波振动钻削力振幅较小, 超声波振动钻削的稳态钻削力显著小于常规钻削方式。随着进给速度的增大使钻头受到的轴向作用力更大, 形成更大的平均轴向力。在主轴转速 5 000 r/min 及进给速度 7 mm/min 下超声波振动可以有效降低切削温度, 钻削轴向力为 1.28 N, 比常规钻削方式减小了 18.46%。

关键词: 微孔钻削; 不锈钢; 超声振动; 进给速度; 表面质量

中图分类号: TG52 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)04-0099-05

Experimental Study on Microhole Drilling of 304 Stainless Steel Assisted by Ultrasonic Vibration

MIN Linfeng¹, FU Yanjie¹, LI Feng²

(1. Ruian College of Wenzhou Vocational and Technical College, Wenzhou 325035, China;

2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The experimental research on 304 stainless steel micro-hole drilling was carried out with the assistance of ultrasonic vibration, and based on the analysis of the mechanism of ultrasonic vibration micro-hole drilling, the micro-hole machining process was studied in-depth to ensure the micro-hole machining accuracy. The results show that the drilling load process consists of three stages: drilling, stabilizing and drilling out. The amplitude of ultrasonic vibration drilling force is small, and the steady drilling force of ultrasonic vibration drilling is significantly smaller than that of conventional drilling method. With the increase of feed speed, the axial force on the drill bit will be greater, resulting in a larger average axial force. At the spindle speed of 5 000 r/min and the feed speed of 7 mm/min, ultrasonic vibration can effectively reduce the cutting temperature, and the drilling axial force is 1.28 N, 18.46% less than the conventional drilling method.

Keywords: microhole drilling; stainless steel; ultrasonic vibration; feed speed; surface quality

0 引言

将不锈钢应用于汽车制造领域属于当今世界各国的一个热点研究方向。与传统汽车材料相比, 采用不锈钢制造车体能够极大减轻轿车质量, 还能显著增强了整车的支撑能力和稳定性; 同时不锈钢还具有良好耐氯离子腐蚀性和耐高温性能。因此, 在汽车尾气排放系统中得到了广泛应用^[1-3]。通常情况下, 直径小于 1 mm 的钻孔加工被称作微孔加工。该加工工艺在精密金属加工、电路板设计等方面得到了广泛使用, 并且与其他特殊加工方式(例如电火花)相比具有更高性价比^[4-5]。

在小型机械制造技术发展初期, 研究者们一直都是关注设备小型化方面的内容。由于微小机械结构的刚度和抗冲击性较差, 导致制造精度难

以满足实际控制指标要求^[6-7]。张泽华等^[8]开展非分离型超声振动钻削的钻削温度和钻削力测试研究, 超声振动钻削相较于普通钻削轴向力降低约 20%, 温度可降低约 25%, 表现出很好的轴向力控制。赵雪岩等^[9]分析超声辅助微钻削过程中的切削状态, 分析孔钻削力、孔壁质量和孔出口质量, 施加超声辅助微钻削对孔的内壁质量有较明显改善, 可有效抑制孔出口的崩边。王东等^[10]以超声振动为激励基础的振动系统, 建立动力学模型, 分析超声振动产生的动态冲击力幅值, 设计出动态冲击力幅值的大小与钻头直径近似为线性关系, 会使动态冲击力幅值增加。

根据有关研究数据可知, 相对于常规钻孔技术, 利用超声波辅助技术进行高级材料切削加工可以获得更高的效率^[11-12]。本文在分析超声振

第一作者简介: 闵林锋(1982—), 男, 浙江桐乡人, 实验师, 本科, 研究方向为机械制造、机械设计, abc12345678900711@126.com。

动微孔钻削机制的基础上,开展超声振动辅助下 304 不锈钢微孔钻削实验研究。

1 超声振动微孔钻削机制

1.1 运动轨迹

超声振动钻削的原理是对刀具运行过程设置超声振动作用。图 1 给出了轴向超声振动的钻削控制机制,建立了如下的超声振动钻削切削刃运动方程。

$$\begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \\ z = \frac{f_z}{2\pi n} \theta + A \sin \left(\frac{60f_v}{n} \theta + \alpha_v \right) \\ \theta = \omega t \end{cases} \quad (1)$$

式中: n 为主轴转速; f_z 为进给量; A 为振动幅值; f_v 为振动频率; α_v 为最初相位; r 为刀刃半径; θ 为刀刃转角。

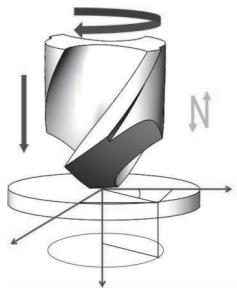
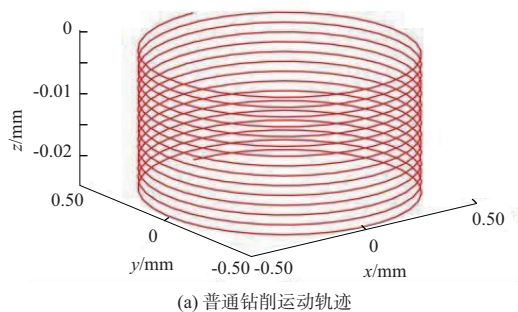
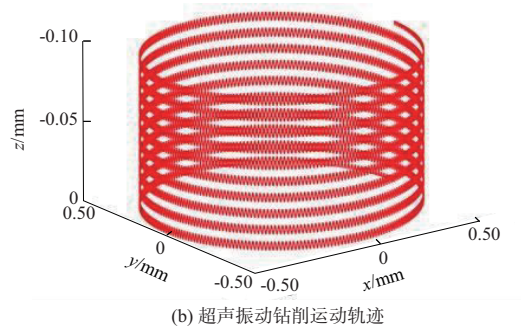


图 1 超声振动切削原理

图 2 为钻头切削刀刃最外侧运动轨迹图,显示了将超声波振动钻孔工具最外层移动路径与常规钻孔移动路径进行比较的结果。通过分析可以发现,常规钻孔方式形成的刀刃移动路径呈现螺旋式曲线,如图 2(a) 所示。而超声波钻孔方式则是沿 z 方向形成了规律性的高频振荡特征。对于实际生产过程,当工具受到高频振动激励作用时,会使刀具与加工材料发生周期剥离^[13-14],如图 2(b) 所示。



(a) 普通钻削运动轨迹



(b) 超声振动钻削运动轨迹

图 2 钻头切削刀刃最外侧运动轨迹图

1.2 分离超声振动钻削

加工过程中使用的双刃麻花钻包含了 2 条主切削刃与横刃。

得到瞬时切削厚度 h 算式:

$$h = z_2 - z_1 = \frac{f_z}{2n} + A \left[\sin \left(\frac{60f_v}{n} (\theta + \pi) + \alpha_v \right) - \sin \left(\frac{60f_v}{n} \theta + \alpha_v \right) \right] \quad (2)$$

进行分离切削加工时应符合下面 2 个条件:

$$\begin{cases} h = \frac{f_z}{2n} + 2A \sin \left(\frac{60f_v}{2n} \pi \right) \cos \left[\frac{60f_v}{n} \theta + \alpha_v + \frac{60f_v}{2n} \pi \right] = 0 \\ \frac{dh}{d\theta} = -2A \frac{60f_v}{n} \sin \left(\frac{60f_v}{2n} \pi \right) \sin \left[\frac{60f_v}{n} \theta + \alpha_v + \frac{60f_v}{2n} \pi \right] \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

以超声振动频率和钻头转速比例作为频转比,表示成以下的形式:

$$\frac{f_r}{4A} < \left| \sin \left(\omega_f \cdot \frac{\pi}{2} \right) \right| \quad (4)$$

建立如下的分离切削算式:

$$\frac{f_r}{4A} < \left| \sin \left(\omega_f \cdot \frac{\pi}{2} \right) \right|, \quad \frac{60f_v}{2n} \neq [0, 1, 2, 3, 4, 5, n] \quad (5)$$

进行非接触式超声波振动钻削加工时,钻头 2 个刀刃间距随旋转刀具的转动而发生周期性改变,2 个刀刃的运动轨迹发生了先增加后减少,最后形成相互交叉的状态。以上结果表明:施加超声波振动钻削时,形成更厚的切屑,但存在破碎的现象,即超声振动钻削产生的切屑不再保持等厚的状态,而是发生了断屑的现象。在微细孔钻孔的过程中,如断屑能被及时排出,可以降低切削温度,减少切削阻力,有效改善加工质量。

2 微孔钻削试验设计

本文采用 304 不锈钢作为测试材料进行微细

孔钻削加工,分析了微细孔加工过程中存在的问题,为深入研究微细孔加工过程,保证微细孔加工精度,提出了合理的加工参数。

2.1 试验方案

为了更好地完成 304 不锈钢钻孔试验,获取可靠测试数据,要求微型加工机床设计、制造和参数设置都能满足技术要求,以实现其控制精度。图 3 显示了本试验使用的高精密 CNC 微细加工机床局部结构图及工作原理。

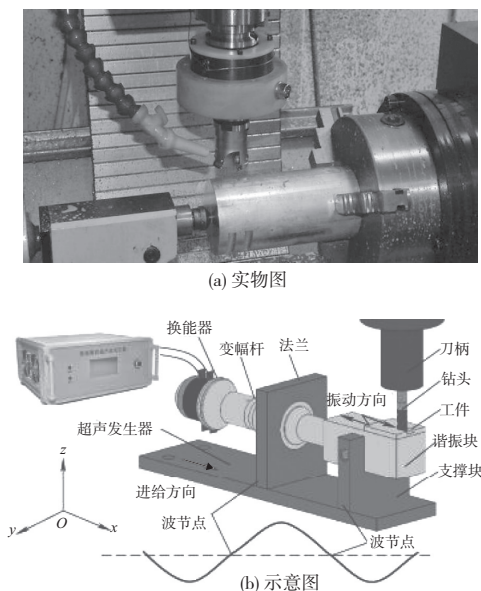


图 3 高精度三轴数控微切削机床

根据以上分析,本文设计了一种新型高精度数控加工系统,如图 4 所示。本次建立的机械结构为机床总体构架,包括支承件、三轴进给机构以及主轴机构。当 CNC 系统获取指令之后,再将指令输入机床各轴来实现精确运动控制,包括驱动器、控制器及三轴数控系统^[15]。

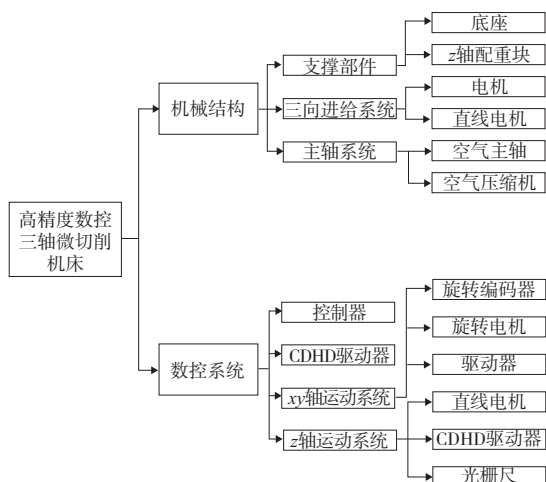


图 4 高精度三轴数控微切削机床框架结构示意图

2.2 测量及观测装置

本文建立的超声振动系统包含变压器、振幅控制器及振动台 3 个主要部分,可以产生 20 kHz 与振幅 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的超声振动。采用 Kistler 9119AA2 测力仪进行载荷测试。通过超景深显微镜观察了微切削处理的工件表面,比较了各个切削条件下形成的微孔表面结构差异性。

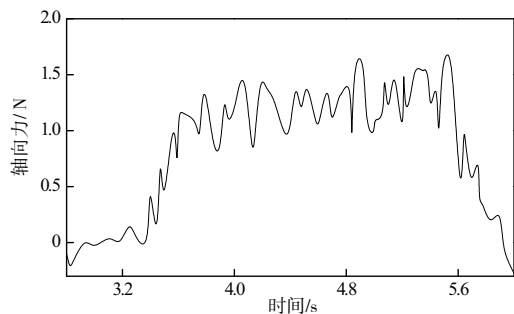
2.3 试验方案设计

本试验以切削速率为自变量,以钻孔轴向力为因变量,在每组参数下依次进行 3 次钻孔试验,再计算每次 3 个同一参数下的平均钻削载荷。设定测试编号 11、12、13、14 为连续超声波振动,其他编号是分开形式的超声波钻削。在本次试验中控制每个钻孔深度都保持 3 mm。

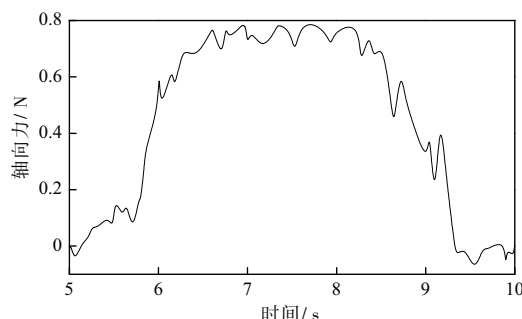
3 试验结果分析

3.1 切削力动态变化

控制转速为 5 200 r/min 以及进给速度为 7 mm/min 下,测试得到图 5 所示的钻削载荷-时间关系图。在进行钻孔的过程中,可以清晰看到钻入、稳定和钻出的 3 个阶段。



(a) 普通钻削



(b) 超声振动钻削

图 5 普通钻削、超声振动钻削轴向力图

初始钻削过程中,刀具横向刀刃首先与工件发生接触。在这个过程中,轴向力快速增大,此时刀具受到作用力而产生弯曲现象,并出现微小偏

移。当钻头快到达底部区域时,进入了平稳钻削状态,这时主切削刃开始发挥主导切削功能,钻削力逐渐趋于平稳。在接近工件底面时,工件底面发生了变形,钻入过程中的轴向力逐渐降低至 0。进行钻孔的过程中,由于钻头刚度不够,会引起钻削阶段发生明显抖动,同时还会受工件反作用力而引起刀具发生震荡和高频振动。常规钻孔与超声波振动钻孔保持同样的轴向受力趋向,而超声波振动则具有高频率的特点,与被加工对象会产生周期分离的效果。以上测试结果表明,超声波振动钻削力振幅较小,采用超声波振动钻削方式的稳态钻削力显著小于常规钻削方式。这是因为在同样钻削时间内,超声振动和工件的接触时间比常规钻削方式更短,从而大大减少了实际切削的时间。这可以减少切削瘤,又可以大幅减缓常规钻削应力。由于在工件发生高频率振动的时候,会造成钻头瞬间撞击速度迅速增加,从而更易出现裂纹。

3.2 轴向切削力随进给速度的变化

进行常规钻孔和超声波振动钻孔的过程中形成的平均轴向力-进给速度对应关系如图 6 所示。在同样转速条件下,随着进给速度的增大,形成了更大的平均轴向力。将进给速度由 7 mm/min 提高到 15 mm/min 时,在正常钻削的平稳阶段与主轴转速为 3 600 r/min 的情况下,轴向力由 1.44 N 提高为 1.98 N,对应变化比例达到 37.5%;设定主轴转速 5 200 r/min 时,进行常规稳定钻削的轴向力由 1.22 N 提高至 1.73 N,变化幅度达 41.8%。超声振动方式的轴向力均值由 0.89 N 提高到 1.57 N 时,变化比例达到 76%。

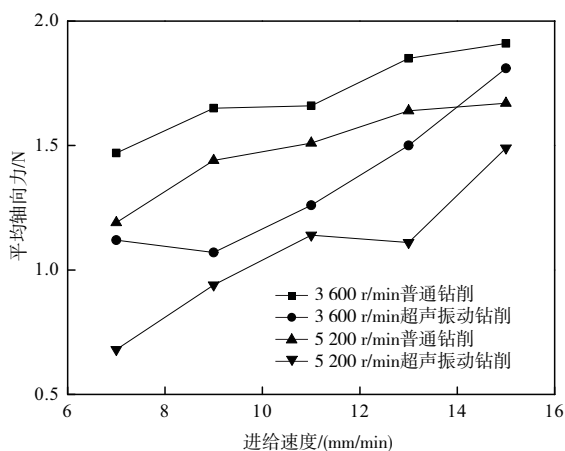


图 6 微孔钻削稳定阶段轴向力随进给速度的变化

随着切削速度的加快,刀具的切削时间逐渐

缩短,切削刃每次切削厚度增加和钻头瞬间撞击速度的提高都会引起材料发生变形,从而需要提高钻削力。在增大进给速度的情况下,会使钻头受到的轴向作用力更大,使钻头断裂几率增大,从而降低生产效率,导致整体成本随之上升。

3.3 分离超声振动钻削轴向力的变化规律

两种超声波振动钻削轴向载荷与时间对应关系如图 7 所示。图 7(a)为分离超声波振动钻削轴向力,转速为 3 600 r/min,进给速度为 9 mm/min。图 7(b)为连续分布的超声波振动钻削轴向力曲线。

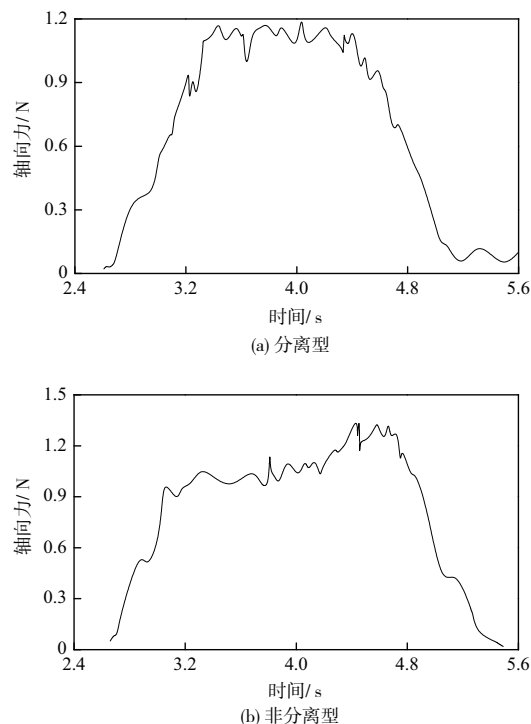


图 7 超声振动钻削轴向力曲线

设定转速 3 600 r/min 并保持进给速率 9 mm/min 的情况下,常规钻削方式形成的稳定轴向力是 1.57 N,分离超声方式的轴向力是 1.15 N,减小了 26.75% 左右。设定主轴转速 5 000 r/min 以及进给速度 7 mm/min 时,转化为不可分离的超声波振动钻削,此时获得的轴向力是 1.28 N,比常规钻削方式减小了 18.46%。分离式超声波振动钻削因易于断屑,便于及时排出切屑,可以有效降低切削温度,减小轴向载荷。在低进给速度 (7 mm/min) 的情况下,与常规钻削相比,发生了载荷下降很大的现象。造成以上现象的原因是,进行非连续超声波振动钻削加工时,刀刃移动可以促使切屑卷曲,使切屑更易超过断屑的应力值,促使断屑形成,有效排屑则有利于获得更低的切

削温度。在使用非分离式超声波振动钻削加工方式时,由于刀具刀刃发生移动,不能及时切断切屑,从而造成碎片在排屑槽中发生积累,增加了刀具磨损程度,无法有效降低钻削力。

4 结语

开展超声振动辅助下 304 不锈钢微孔钻削试验分析,得出如下结论。

1) 钻削载荷过程有钻入、稳定和钻出的 3 个阶段。超声波振动钻削力振幅较小,超声波振动钻削的稳态钻削力显著小于常规钻削方式。

2) 随着进给速度的增大会使钻头受到的轴向作用力更大,形成了更大的平均轴向力,轴向力由 1.44 N 提高到 1.98 N,对应变化比例达到 37.5%。

3) 主轴转速 5000 r/min 及进给速度 7 mm/min 时超声波振动可以有效降低切削温度,钻削轴向力为 1.28 N,比常规钻削方式减小了 18.46%。

参考文献:

- [1] 吕康,付朝霞,陈伟,等. 基于 DEFORM-3D 轴向振动钻削 304 不锈钢有限元仿真[J]. 制造技术与机床, 2023(5):64-68.
- [2] 冯亚洲,牛蕊东,刘战锋. 不锈钢超细长深孔钻削试验研究[J]. 工具技术,2022,56(4):33-36.
- [3] 樊瑞军,关志伟,孙翠香. 不锈钢模具微小孔钻削加工参数优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(2):114-117.
- [4] 梁志强,马悦,聂倩倩,等. 不锈钢微孔超声空化辅助钻削试验研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(1): 205-212.
- [5] 高飞,白海清,安熠蔚,等. 316L 不锈钢增材成型件小孔钻削试验研究[J]. 现代制造工程, 2019(9): 48-53,36.

- [6] ZHANG T,LIU Z Q,SHI Z Y,et al. Investigation on size effect of specific cutting energy in mechanical micro-cutting [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017,91(5):2621-2633.
- [7] 寇晓晨,张磊,苗莉莉. 基于微细切削理论的微小孔钻削力预测模型和实验研究[J]. 制造技术与机床, 2021(10):100-104.
- [8] 张泽华,董志国,曹桂新,等. Ti6Al4V 分离型超声振动微钻削的钻削特性仿真与试验研究[J]. 工具技术, 2023,57(9):64-68.
- [9] 赵雪岩,董志国,轧刚,等. SiCp/Al 超声辅助扩孔微钻削的切削特性与试验研究[J]. 机械设计与制造, 2022(12):164-167,171.
- [10] 王东,焦锋,张世杰,等. 纵向超声振动钻削 CFRP/钛合金叠层材料的动态冲击效应分析[J]. 振动与冲击, 2020,39(17):47-56.
- [11] 白小云,孙素杰,魏秋艳,等. SiCp/Al 复合材料微孔钻削的仿真分析和试验研究[J]. 机械设计与制造, 2023(5):134-137.
- [12] 梁桂强,姚峰,杜冰. 超声振动与切削工艺参数耦合关系的有限元分析[J]. 机械科学与技术, 2025, 44(1):40-48.
- [13] 庞继伟,李升,郭明波,等. C/SiC 复合材料微孔的电镀金刚石钻头钻削加工[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2023,43(1):90-95.
- [14] 刘传慧,陈晓静,侯晓晓,等. 刃磨大长径比刀具设计及其钻削性能实验分析[J]. 机械设计与制造, 2023(9):150-152,156.
- [15] 程耀楠,马春杰,张剑宇,等. 高速干式滚齿加工工艺参数优化研究进展[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2022,27(2):10-20.

收稿日期:2023-11-17

(上接第 98 页)

- [3] FORWARD R L. Electronic damping of vibrations in optical structures [J]. Applied Optics, 1979, 18(5): 690-697.
- [4] HAGOOD N W,VON FLOTOW A. Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks [J]. Journal of Sound Vibration, 1991,146(2):243-268.
- [5] VIGUIÉ R, KERSCHEN G. The nonlinear tuned vibration absorber [J]. MATEC Web of Conferences, 2012,1:05007.
- [6] 伍敏. 轴承-转子系统的非线性耦合振动解析分析及

实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.

- [7] VON WAGNER U,HAGEDORN P. Nonlinear effects of piezoceramics excited by weak electric fields [J]. Nonlinear Dynamics, 2003,31(2):133-149.
- [8] SHIVASHANKAR P,KANDAGAL S B. Characterization of elastic and electromechanical nonlinearities in piezoceramic plate actuators from vibrations of a piezoelectric-beam[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019,116:624-640.

收稿日期:2023-10-09