

# 不锈钢微孔超声辅助钻削仿真与试验研究\*

聂倩倩, 王西彬, 梁志强, 周天丰, 焦黎, 颜培

(北京理工大学先进加工技术国防重点学科实验室, 北京 100081)

**[摘要]** 针对不锈钢微孔钻削过程钻削应力大、断屑排屑困难和加工质量差等问题, 开展了超声辅助钻削研究。分析了普通和超声钻削过程的钻头运动轨迹和轴向切削厚度, 采用有限元仿真和钻削试验相结合的方式分析了超声振动对钻削力、切屑卷曲半径和微孔形貌的作用。结果表明: 与普通钻削相比, 超声钻削过程中, 钻头有效切削作用时间和横刃作用区域应力降低, 切屑卷曲半径减小, 容易断屑, 并且钻削力和微孔入口毛刺减小, 微孔形貌大幅改善。

**关键词:** 不锈钢; 微孔; 超声辅助钻削; 仿真; 钻削力; 切屑形貌

## Simulation and Experimental Study on Ultrasonic Assisted Micro Drilling of Stainless Steel

NIE Qianqian, WANG Xibin, LIANG Zhiqiang, ZHOU Tianfeng, JIAO Li, YAN Pei

(Key Laboratory of Fundamental Science for Advanced Machining, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**[ABSTRACT]** Ultrasonic-assisted drilling (UAD) is employed to solve the problems of large drilling stress, difficulty of chip breaking and removal, and poor machining quality in micro drilling of stainless steel. Drill trajectory and axial cutting thickness in conventional drilling (CD) and UAD processes were analyzed. The effect of ultrasonic vibration on drilling force, chip curling radius and hole morphology were investigated based on the finite element simulation and experiment results. The results indicate that compared with CD, the effective cutting time and cutting stress under chisel edge are reduced significantly, the chip curling radius is smaller and thus chip is easier to break, the thrust force and entrance burr are reduced, and micro-hole quality is improved in the UAD process.

**Keywords:** Stainless steel; Micro-hole; Ultrasonic-assisted drilling; Simulation; Thrust force; Chip morphology

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.11.094

近年, 超声振动钻削试验和理论研究主要集中在钻削力、刀具磨损、毛刺、钻削温度等方面。Wang 等<sup>[1]</sup>研究了切削时间比对钻削力的作用。Isobe 等<sup>[2]</sup>观察树脂钻削过程应力分布, 发现超声振动钻削明显改善了横刃和孔壁区域应力。Barani 等<sup>[3]</sup>指出超声振动能够减少刀具粘着磨损和积屑瘤的产生。Liao 等<sup>[4]</sup>发现超声振动钻削断屑排屑效果好, 使得钻孔质量和效率显著提高。同时超声振动钻削可以明显改善 CFRP 分层缺陷<sup>[5]</sup>、45 钢的钻削毛刺<sup>[6]</sup>和钻骨温度<sup>[7]</sup>。Li 等<sup>[8]</sup>利用超声振动实现了颅骨 0.3mm 微孔的高精度加工。此外, 有学者也进行了超声振动钻削有限元仿真研究。Amini 等<sup>[9-10]</sup>发现超声振动明显减小了加工区域温度和应力。闫明鹏等<sup>[11]</sup>通过仿真发现了超声振动钻削切屑较小且卷曲变形大。

不锈钢微孔钻削过程断屑排屑更加困难、加工质量

不容易保证, 然而目前针对不锈钢微孔超声振动钻削的机理和特性的研究较少。本文通过仿真和试验结合的方法分析了不锈钢微孔超声振动钻削机理。

### 1 超声振动钻削基本原理

如图 1 所示, 超声振动钻削是在普通钻削的基础上, 对钻头或者工件施加周期性的高频振动, 使得刀尖与工件相对运动轨迹发生改变, 从而改变了钻削机理。

微孔零件被广泛地应用于航空航天、精密机械、医疗等领域。目前微孔多采用普通钻削加工, 但是微细钻头刚度低、入钻位置容易偏移; 断屑排屑困难, 长切屑缠绕堆积在螺旋槽中, 影响微孔加工质量。此外, 微细钻削受尺寸效应的影响, 材料的去除过程以挤压和耕犁为主, 刀具刃口区域受力大, 容易引起微崩刃和微裂纹, 导致刀具失效<sup>[12]</sup>。而超声钻削在难加工材料微孔加工方面具有有效降低钻削力、改善断屑排屑性能和提高微孔加工质量及精度等众多优势<sup>[13]</sup>。

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51575049); 国家重点基础研究计划项目(2015CB059900); 微系统与微结构制造教育部重点实验室开放课题研究项目(2015KJM005)。

假设刀具转速为 $n$  (r/min), 每转进给量为 $f_r$  ( $\mu\text{m}/r$ ), 超声振幅和频率分别为 $A$  ( $\mu\text{m}$ ) 和 $f$  (Hz), 则普通钻削和超声振动钻削过程, 切削刃上上周向角位移为 $\theta$  (rad) 时, 对应的空间坐标分别为公式(1)和(2)。

$$\begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \\ z = -f_r \theta / 2\pi \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \\ z = -f_r \theta / 2\pi + A \sin(f\theta/n) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $r$  为钻头切削刃上某点到钻头中心线的垂直距离,  $x, y, z$  为钻头切削刃上某点在钻头柱坐标系中的位置, 其中  $xy$  平面为工件的钻入面。

当  $r=0.5\text{mm}$ ,  $f=21500\text{Hz}$ ,  $n=14000\text{r}/\text{min}$ ,  $f_r=20\mu\text{m}/r$ ,  $A=1\mu\text{m}$  时, 绘制出主切削刃外缘点的三维运动轨迹, 如图 2 所示。与普通钻削的运动轨迹不同, 超声振动钻削的刀尖运动轨迹是附加了正弦波动的三维空间螺旋曲线。

对钻头切削厚度进行分析, 普通钻削和超声钻削的切削厚度公式为(3)和(4)<sup>[4]</sup>。当  $r=0.5\text{mm}$ ,  $f=21500\text{Hz}$ ,  $n=14000\text{r}/\text{min}$ ,  $f_r=20\mu\text{m}/r$ ,  $A=1\mu\text{m}$  时, 超声钻削过程理论切削厚度如图 3 所示。普通钻削过程切削厚度  $a_c$  是恒定值, 其大小等于每齿进给量。而超声振动钻削的轴向瞬时切削厚度不再恒定, 而是随钻尖旋转角度的改变周期性变化。当超声和切削参数满足一定条件时, 超声振动钻削过程会周期性地出现瞬时切削厚度为零的区间, 表明刀具与工件时切时离。刀具接触切削区时, 产生动态切削力; 刀具离开切削区时, 切削力为零。切削过程由普通钻削的连续切削变为瞬时、脉冲的动态切削过程。

$$a_c = \frac{f_r}{2} \quad (3)$$

$$a_c = \frac{f_r}{2} + 2A \cos\left(\frac{60f\theta}{n} + \frac{30f\pi}{n}\right) \sin\left(\frac{30f\pi}{n}\right) \quad (4)$$

## 2 超声振动钻削仿真

基于 DEFORM 软件建立了微细钻削的有限元模型, 如图 4 所示。工件材料为 304 不锈钢, 尺寸为  $\phi 0.8\text{mm} \times 0.4\text{mm}$ 。刀具材料为 WC-Co 硬质合金, 刀具直径为  $0.5\text{mm}$ 。采用时间增量步计算, 步长设置为  $2.5 \times 10^{-6}\text{s}$ 。采用绝对网格划分方式, 刀具和工件最小网格尺寸设置为  $5\mu\text{m}$ , 并且对切削区域的网格细化。约束工件侧面的所有自由度, 保证仿真过程工件不会倾倒或平移。按照表 1 设置有限元模拟加工参数。

### 2.1 钻削力和应力分布

观察一个振动周期(18步), 钻削过程的刀具速度

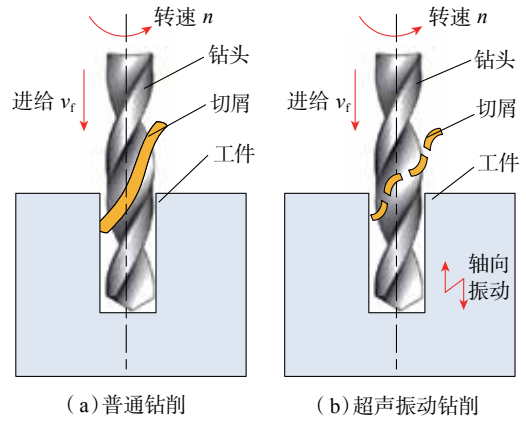


图1 超声振动钻削原理

Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic-assisted drilling

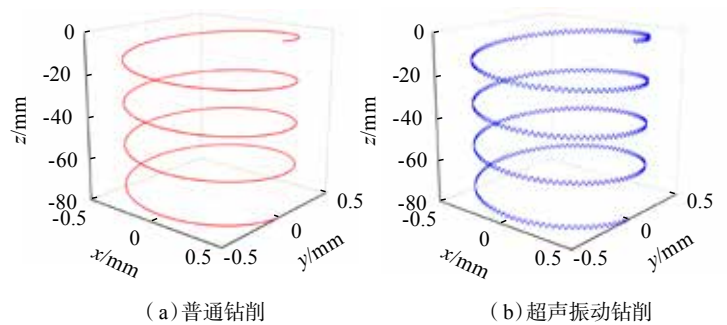
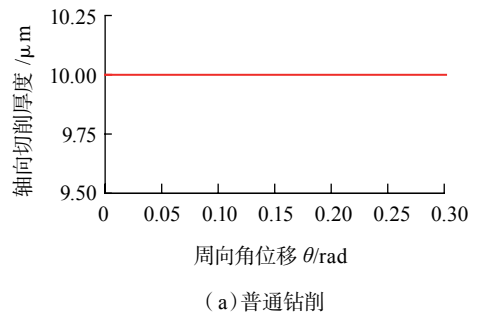
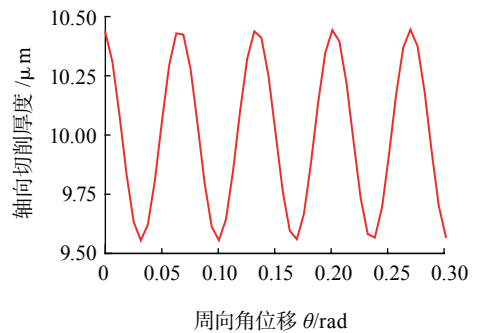


图2 刀尖的三维运动轨迹

Fig.2 Three-dimension trajectory of tool tip



(a) 普通钻削



(b) 超声振动钻削

图3 钻头轴向切削厚度

Fig.3 Axial cutting thickness

和工件应力分布。由图 5 可以看出,普通钻削过程从第 1590 步到第 1608 步,刀具以恒定的速度朝着工件进给,连续切削,刀具主切削刃和横刃作用下的等效应力分布区域和数值都很大。随着钻削深度增加,等效应力从 1105MPa 逐渐增大至 1133MPa。

而超声振动钻削过程中,刀具切削速度大小和方向在周期性变化,切削应力也随之动态改变。如图 6

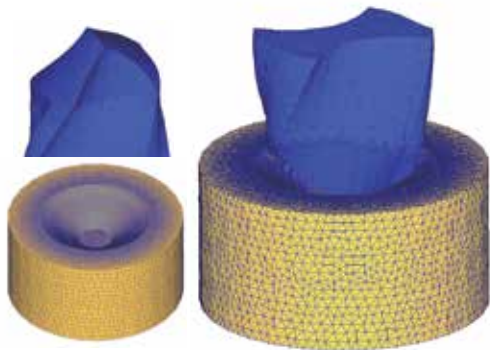
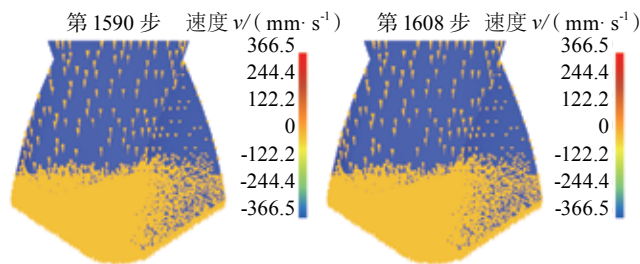


图4 钻削有限元模型

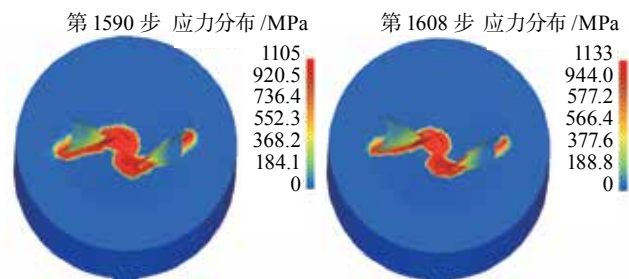
Fig.4 Finite element model of drilling process

表1 钻削仿真参数

工件/ 刀具	转速/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	进给/ ( $\mu\text{m} \cdot r^{-1}$ )	频率/ Hz	振幅/ $\mu\text{m}$	模型 特性	摩擦类型 (因子)
工件	—	—	—	—	塑性	剪切摩擦 (0.7)
刀具	14000	20	215	1	刚性	剪切摩擦 (0.7)



(a) 刀具速度



(b) 工件应力分布

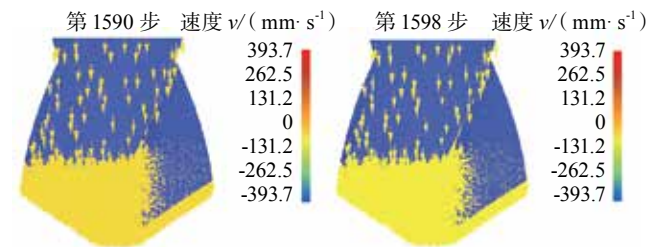
图5 普通钻削刀具速度和工件应力分布

Fig.5 Tool velocity and stress distribution in CD

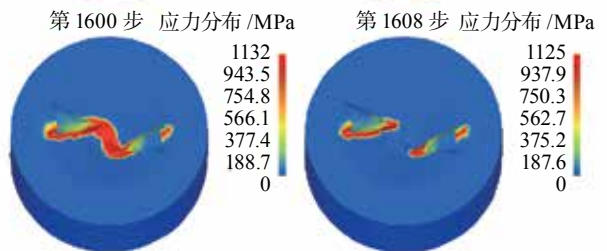
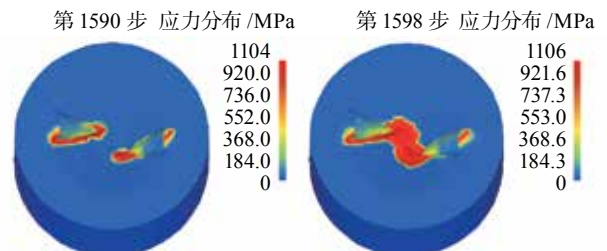
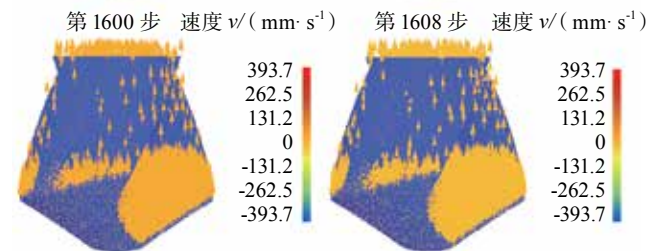
所示,第 1590 步到第 1598 步,刀具轴向速度为负,经历了加速和减速切削工件阶段,工件等效应力范围为 1104~1106MPa。随着钻削进行,横刃附近应力分布区域逐渐增大。第 1600 步到第 1608 步,刀具轴向速度为正,经历了加速和减速离开工件阶段,等效应力范围为 1125~1132MPa。而横刃附近应力分布区域和数值迅速减小。

一个振动周期中,普通钻削过程横刃区域始终存在应力,而超声振动钻削在刀具远离工件阶段,钻头对切屑的冲击作用使得主切削刃区域应力稍增大,而横刃区域应力为零,因此超声振动钻削可以明显改善横刃切削状况。

钻削力随钻削位移的变化曲线如图 7 所示。可以看出,普通钻削和超声振动钻削力都先增大后趋于平



(a) 刀具速度



(b) 工件应力分布

图6 超声振动钻削刀具速度和工件应力分布

Fig.6 Tool velocity and stress distribution in UAD

稳。钻削稳定阶段,普通钻削力在 8N 上下波动,而超声振动钻削过程的瞬时切削厚度周期性变化,超声振动钻削力出现了从 1~10N 的较大幅度振荡。普通钻削和超声钻削平均力分别为 8.1N、4.1N,最大力分别为 13.5N、11.8 N。超声振动显著降低了平均钻削力,这是由于超声振动钻削过程,超声冲击作用使得塑性金属材料去除更容易<sup>[15]</sup>。

### 2.2 钻削切屑形貌

钻削过程刀具前刀面对切屑的挤压作用如同分布力作用在悬臂梁一侧,产生弯矩,引起滑移线呈上凸形,导致切屑底层与顶层在流出速度上存在差异,促使切屑弯曲以致折断<sup>[16]</sup>。从图 8 可以看出,普通钻削断屑过程是刀刃和工件的挤压作用,而超声振动钻削断屑过程是挤压和刀刃冲击的综合作用,超声冲击作用会加大切屑的卷曲变形程度。

当切屑弯曲应变超过塑性材料的临界断裂应变,切屑将折断。由最大应变理论,切屑折断判据为<sup>[17]</sup>:

$$\varepsilon_f \geq \varepsilon_b, \varepsilon_f \propto a_{ch} / R_c \quad (5)$$

式中,  $\varepsilon_f$  是切屑卷曲应变,  $\varepsilon_b$  是临界断裂应变,  $R_c$  是切

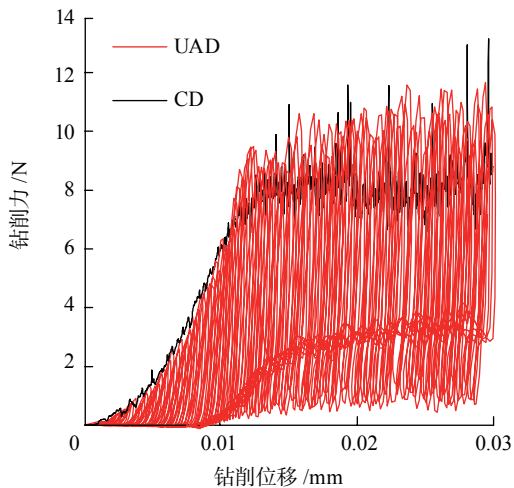


图7 普通和超声钻削力

Fig.7 Thrust force in CD and UAD processes

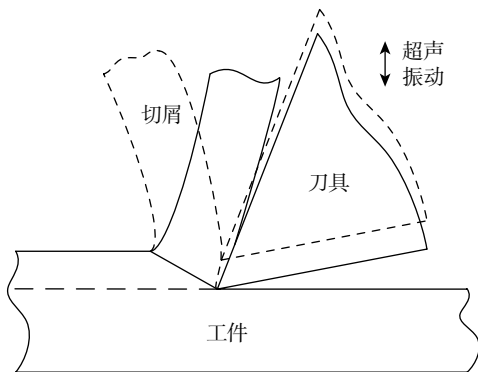


图8 超声振动对切屑卷曲变形的作用

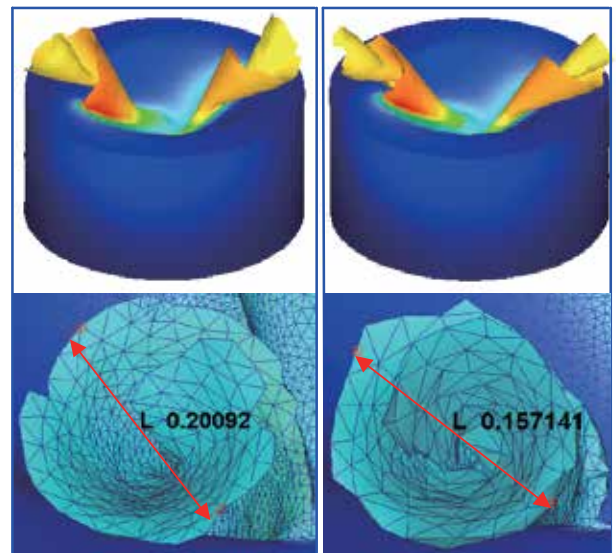
Fig.8 Effect of ultrasonic vibration on chip curling

屑卷曲半径,  $a_{ch}$  是切屑厚度。

同一时刻( $t=0.078s$ )普通钻削和超声钻削切屑如图 9 所示,两种钻削过程都产生了螺旋卷状切屑,但是切削卷曲变形程度不同。普通钻削和超声钻削切屑卷曲半径分别为 0.1mm 和 0.078mm,超声钻削切屑卷曲半径  $R_c$  小,由式(5)可知,切削卷曲应变大,容易达到材料的临界断裂应变实现断屑,因此超声振动过程可以产生短碎切屑,改善微孔钻削性能和质量。

### 3 超声振动钻削试验

普通钻削和超声钻削试验在五轴高速加工中心(DMU80mono BLOCK)上进行,试验装置如图 10 所示。超声振动系统如图 11 所示,主要由超声振动子、超声波发生器、功率放大器及夹具组成。对超声振子同时施加



(a) 普通钻削 (b) 超声振动钻削

图9 切屑形貌和卷曲半径

Fig.9 Chip morphology and curling radius

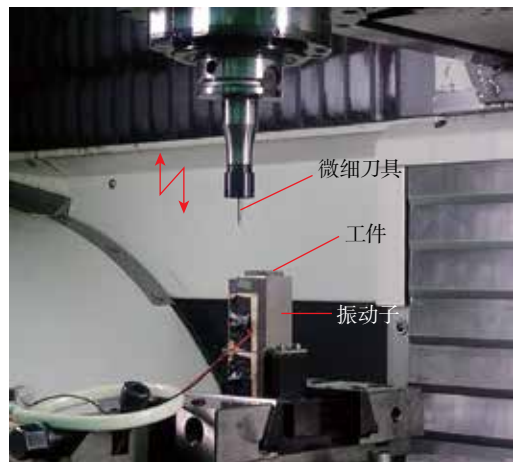


图10 钻削试验装置

Fig.10 Experimental setup

两个具有相同频率且有一定相位差的交流电压信号使得超声振子和工件产生  $z$  向振动。钻削试验前,通过多普勒测振仪 (Polytec OFV-505) 对工件振动特性进行检测。检测装置如图 12 所示,检测得到的工件振动波形如图 13 所示。工件振动频率与超声发生器频率相同,为 21500Hz,振幅为  $0.1\mu\text{m}$ 。钻削试验参数如表 2 所示。工件材料为 304 不锈钢,尺寸为  $20\text{mm} \times 20\text{mm} \times 2\text{mm}$ 。刀具是自行刃磨的硬质合金钻头。刀具形貌如图 14 所示,微细钻头几何参数为:直径  $0.5\text{mm}$ ,芯径  $0.125\text{mm}$ ,切削刃长  $1.5\text{mm}$ ,锋角  $118^\circ$ ,螺旋角  $30^\circ$ ,横刃斜角  $55^\circ$ 。

### 3.1 微孔形貌

利用三维激光扫描显微镜基恩士 (Keyence VK-100) 对普通钻削和超声钻削微孔形貌进行分析。普通钻削加工的第 1 个微孔形貌如图 15 (a) 所示,可以看

出孔底部横刃轨迹不是规则的圆形,而是具有 3 次谐波误差的轨迹,这是由于新钻头定心能力弱、微细钻头刚度低,容易导致钻头产生弯曲变形和不规则摆动。同时普通钻削微孔入口产生了明显的毛刺,这是由于微孔钻削过程,钻头打滑和摆动使得工件入口材料受挤压,塑性变形增大,产生了大的毛刺。

而超声钻削过程,刀具每秒钟作 20000 次以上的往返运动,刀具远离工件的时间内,刀具弯曲变形减小,使得刀具总弯曲变形减小、刀具刚度提高,进而改善了微孔加工质量。如图 15 (a) 所示,超声钻削加工第 1 个微孔横刃轨迹近似圆形,且孔口毛刺小。

加工至第 5 个微孔时,普通钻削(微孔形貌如图 15 (b) 左所示)由于刀具磨损和不锈钢粘刀,使得微孔形

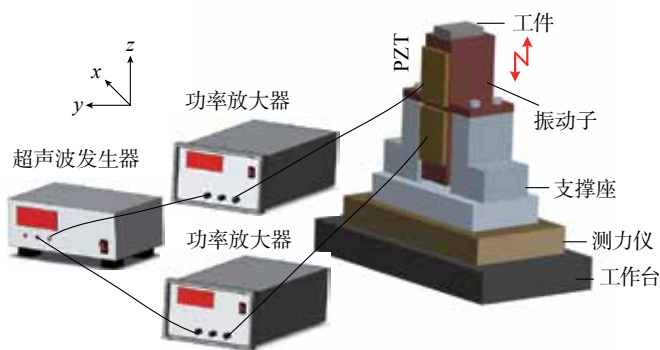


图11 超声振动系统组成

Fig.11 Composition of ultrasonic vibration system

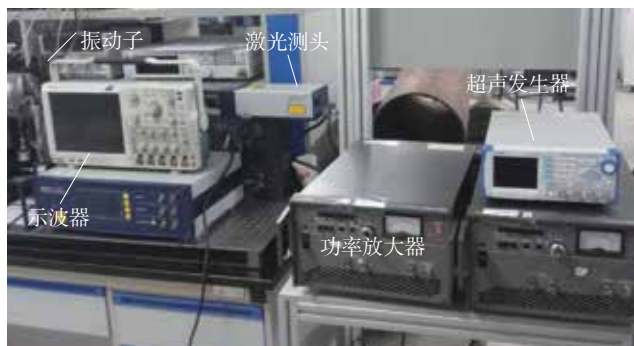


图12 超声振幅检测装置

Fig.12 Ultrasonic amplitude measurement device

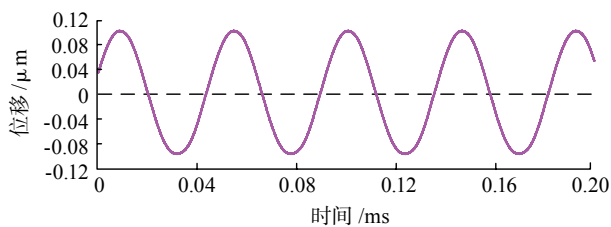
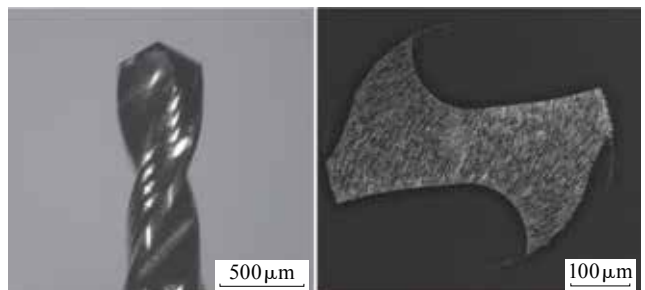


图13 工件振动波形

Fig.13 Vibration waveform of workpiece

表2 钻削试验参数

钻削方式	频率 /Hz	振幅 / $\mu\text{m}$	转速 / ( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )	进给 / ( $\mu\text{m} \cdot \text{r}^{-1}$ )	孔深 / mm
超声	21500	0.1	14000	2	1
普通	—	—	14000	2	1

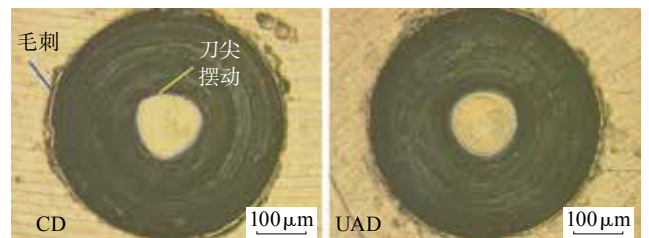


(a) 刀具整体结构

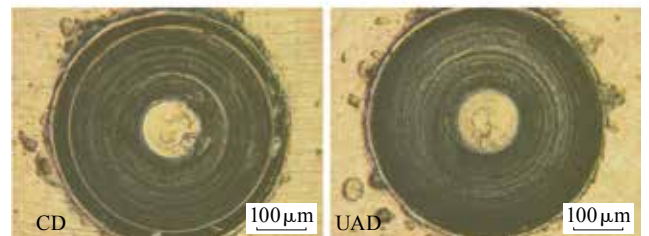
(b) 刀具后刀面

图14 微细钻头整体结构和后刀面

Fig.14 Micro drill overall geometry and tool flank



(a) 钻削第1个孔



(b) 钻削第5个孔

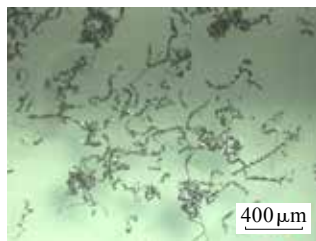
图15 微孔形貌

Fig.15 Micro hole morphology

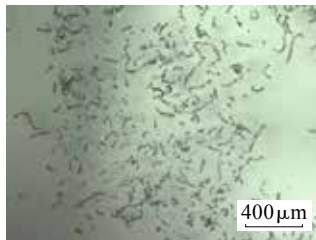
貌严重恶化;而超声钻削微孔具有较好的形貌(图 15 (b)右),这是由于超声冲击作用增强了断屑排屑性能,减少了切屑黏附和切屑划伤孔壁现象。此外,切屑的照片如图 16 所示,可以看出普通钻削产生了长带状切屑,而超声钻削产生的切屑碎小,容易排出微孔。

### 3.2 钻削力

通过三向测力仪(Kistler 9257B)采集普通钻削和超声钻削力。为了准确采集超声钻削力,普通钻削和超声钻削力采样频率均设为测力仪允许的最大值,即 71428Hz。图 17 是钻削至孔中间位置时,普通钻削和超声钻削力的微观波形图。相同的时间段内,普通钻削力的最大值、最小值、平均值分别为 11.94N、10.81N、11.49N,超声钻削力的最大值、最小值、平均值分别为 11.32N、10.09N、10.76N。分析钻削力平均值,与普通钻削相比,超声钻削力减小了 0.73N,下降了 6.4%。这是由于超声钻削过程,刀具超声冲击作用改善了不锈钢的切削加工性能,增强了断屑排屑性能,减少了切屑黏附



(a) 普通钻削



(b) 超声振动钻削

图 16 切屑形貌  
Fig.16 Chip morphology

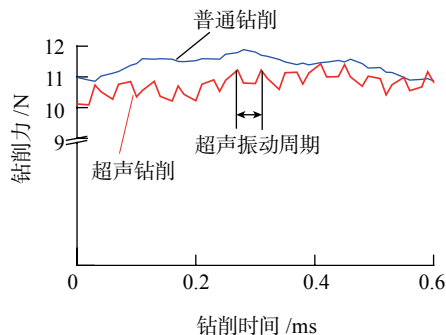


图 17 钻削力微观波形图

Fig.17 Micro-waveform diagram of drilling force

和刀具磨损,使得钻削力减小。

由微孔形貌分析知,加工至第 5 个孔时微细刀具钻削性能已很恶劣,因此仅对前 4 个孔的钻削力进行分析。普通钻削第 1~4 孔的钻削力为:10.6N、11.0N、14.9N、17.4N;超声钻削第 1~4 孔的钻削力为:10.1N、10.2N、13.2N、16.5N。如图 18 所示,普通和超声钻削第 4 孔的钻削力分别为 17.4 和 16.5N,超声钻削下降了 5.2%。仿真过程,普通和超声钻削分别为 13.5、11.8N,超声钻削下降了 12.6%。仿真与试验钻削力的误差为 -22.4%~-28.4%。仿真力比试验力小是因为仿真过程没有考虑钻削试验中的多种影响因素,如钻头与切屑黏结、断屑排屑困难等现象;同时仿真钻头为刚体模型,减小了试验过程中刀具因机床等产生的跳动和变形。因此仿真力小于试验力。

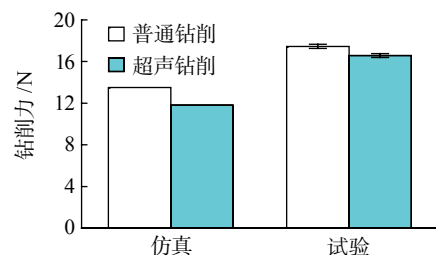


图 18 普通和超声钻削力  
Fig.18 CD and UAD thrust force

## 4 结论

(1) 与普通钻削相比,超声振动钻削过程的断续、脉冲切削特性使得切削作用时间减少,平均钻削力和横刃区域应力明显降低。

(2) 超声振动钻削切屑卷曲半径小,切屑容易折断排出。

(3) 超声钻削减少了刀具的不规则摆动,改善了微孔形貌,减小了入口毛刺。

(4) 与普通钻削相比,超声钻削力降低了 5.2%,仿真与试验力误差为 -22.4%~-28.4%。

## 参考文献

- [1] WANG L J, WANG X, ZHAO H F. Effect of the cutting ratio on cutting forces and the drill life in vibration drilling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, 24(11): 865-872.
- [2] ISOBE H, UEHARA Y, HARA K. Effect of ultrasonic vibration drilling on cutting stress distribution[J]. Key Engineering Materials, 2012, 523-524: 191-196.
- [3] BARANI A, AMINI S, PAKTINAT H, et al. Built-up edge investigation in vibration drilling of Al2024-T6[J]. Ultrasonics, 2014,

54(5): 1300–1310.

[4] LIAO Y S, CHEN Y C, LIN H M. Feasibility study of the ultrasonic vibration assisted drilling of Inconel superalloy[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(12–13): 1988–1996.

[5] MAKHDUM F, PHADNIS V A, ROY A, et al. Effect of ultrasonically-assisted drilling on carbon-fibre-reinforced plastics[J]. Journal of Sound & Vibration, 2014, 333(23): 5939–5952.

[6] HEISEL U, STEHLE T, SCHAAL M, et al. Burr formation in short hole drilling by ultrasonic assistance[J]. Production Engineering, 2014, 8(1): 1–6.

[7] ALAM K, HASSAN E, BAHADUR I. Experimental measurements of temperatures in ultrasonically assisted drilling of cortical bone[J]. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 2015, 29(4): 753–757.

[8] LI Z, YANG D, HAO W, et al. A novel technique for micro-hole forming on skull with the assistance of ultrasonic vibration[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2015, 57: 1–13.

[9] PAKTINAT H, AMINI S. Ultrasonic assistance in drilling: FEM analysis and experimental approaches[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(5–8): 2653–2665.

[10] LOTFI M, AMINI S. Experimental and numerical study of ultrasonically-assisted drilling[J]. Ultrasonics, 2016, 75: 185–193.

[11] 闫明鹏, 邵华. 超声振动钻削钛合金的刀具温度和磨损分析[J]. 工具技术, 2011, 45(8): 26–30.

YAN Mingpeng, SHAO Hua. Tool temperature and wear in ultrasonic vibration drilling titanium alloy[J]. Tool Engineering, 2011, 45(8): 26–30.

[12] AZIZ M, OHNISHI O, ONIKURA H. Novel micro deep drilling using micro long flat drill with ultrasonic vibration[J]. Precision Engineering, 2012, 36(1): 168–174.

[13] SUGANTHI X H, NATARAJAN U, RAMASUBBU N. A review of accuracy enhancement in microdrilling operations[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1): 199–217.

[14] 张学忱, 吕康, 史尧臣, 等. 振动钻削钻头刚性化理论分析 with 试验研究[J]. 制造技术与机床, 2017(11): 52–55.

ZHANG Xuechen, LÜ Kang, SHI Yaochen, et al. Theoretical analysis and experimental research of vibration drilling bit rigidity[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2017(11): 52–55.

[15] 杨杰, 田锡天, 刘书暖. 钛合金超声振动钻削特性研究[J]. 航空制造技术, 2015, 58(15): 83–85.

YANG Jie, TIAN Xitian, LIU Shunuan. Study on ultrasonic vibration drilling of titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(15): 83–85.

[16] 吴明阳, 赵旭, 陈勇, 等. 高压冷却下 PCBN 刀具切削高温合金切屑卷曲折断机理及试验研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(9): 187–192.

WU Mingyang, ZHAO Xu, CHEN Yong, et al. Research on mechanism and experimental of chip breaking during high pressure

cooling turning of superalloys with PCBN tool[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(9): 187–192.

[17] 马利杰, 刘贯军, 王贵成. 轴向振动钻削的断屑机理研究[J]. 机械设计与制造, 2009(2): 228–230.

MA LiJie, LIU Guanjun, WANG Guicheng. Study on mechanism of breaking chip of axial vibration drilling[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(2): 228–230.

通讯作者: 梁志强, 博士、副教授、博士生导师, 研究方向为先进切削磨削与刀具技术、微细加工、微细刀具设计与制造技术、特种机床与装备制造, E-mail: liangzhiqiang@bit.edu.cn。

(责编 铃兰)

(上接第 93 页)

LUO Liangfeng. Normal vector and curvatures estimation on triangular mesh[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.

[10] 段玉岗, 葛衍明, 孟洋, 等. 基于角度与间距可控的纤维铺放轨迹规划[J]. 航空学报, 2015, 36(10): 3475–3482.

DUAN Yugang, GE Yanming, MENG Yang, et al. Trajectory planning of fiber placement based on controlled angle and interval[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(10): 3475–3482.

[11] 熊文磊, 肖军, 王显峰, 等. 基于网格化曲面的自适应自动铺放轨迹算法[J]. 航空学报, 2013, 34(2): 434–441.

XIONG Wenlei, XIAO Jun, WANG Xianfeng, et al. Algorithm of adaptive path planning for automated placement on meshed surface[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(2): 434–441.

[12] 陈正鸣, 刘景, 王志坚. 一个三角网格上曲线的等距线计算方法[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(1): 124–131.

CHEN Zhengming, LIU Jing, WANG Zhijian. Offset algorithm for curves on triangle meshes[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(1): 124–131.

[13] 方宜武, 王显峰, 顾善群, 等. 自动铺丝过程中预浸料的侧向弯曲[J]. 材料工程, 2015, 43(4): 47–52.

FANG Yiwu, WANG Xianfeng, GU Shanqun, et al. Lateral bending of prepreg during automated fiber placement[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(4): 47–52.

[14] 曹德华. 纤维铺放机构的研究与运动分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.

CAO Dehua. Study and motion analysis on fiber placement machine[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.

[15] 许斌. 复合材料自动铺丝编程技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.

XU Bin. Research on automatic wire laying technology of composite material[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005.

通讯作者: 孟月梅, 研究员级高工, 研究方向为计算机辅助软件研究与开发, E-mail: meng625\_105@163.com。

(责编 逸飞)