DOI: 10.3901/JME.2020.01.205

不锈钢微孔超声空化辅助钻削试验研究*

梁志强¹ 马悦² 聂倩倩² 王西彬¹ 周天丰¹ 郭海新²
李 玉³ 陈建军³

(1. 北京理工大学先进加工技术国防重点学科实验室 北京 100081;

2. 北京理工大学机械与车辆学院 北京 100081;

3. 山西柴油机工业有限责任公司 大同 037036)

摘要: 针对难加工材料微细钻削过程中排屑困难及微孔加工质量差的问题, 提出微孔超声空化辅助钻削方法, 分析了超声空化作用机理。通过高速摄像机观测超声空化过程, 发现变幅杆端面形成了锥型空化区域, 其作用范围达到 10 mm 以上。分别进行直径 3 mm 和 0.5 mm 的树脂工件空化钻削试验, 发现超声空化效应均显著改善了切屑对刀具的黏附和缠绕现象。进一步进行了不同转速下不锈钢微孔超声空化钻削试验, 利用激光扫描显微镜对微孔入口形貌、圆度、孔壁形貌和表面粗糙度进行检测。与普通钻削相比, 超声空化钻削的孔径误差降低了 8.5%~15.6%, 入口圆度误差降低了 20.0%~37.8%, 孔壁粗糙度降低了 12.7%~18.6%。结果表明, 超声空化效应能够有效提高微孔钻削的加工质量和精度。

关键词: 超声空化; 微孔形貌; 圆度误差; 表面粗糙度

中图分类号: TG52

Experimental Study on Ultrasonic Cavitation Assisted Micro Drilling of Stainless Steel

LIANG Zhiqiang¹ MA Yue² NIE Qianqian² WANG Xibin¹ ZHOU Tianfeng¹
GUO Haixin² LI Yu³ CHEN Jianjun³

(1. Key Laboratory of Fundamental Science for Advanced Machining, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;

2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;

3. Shanxi Diesel Engine Industry Co., Ltd., Datong 037036)

Abstract: This paper proposes a micro-hole ultrasonic cavitation assisted drilling method to improve chip removal performance and micro-hole machining quality during micro-drilling of difficult-to-machine materials. The mechanism of ultrasonic cavitation is analyzed. Through the observation of ultrasonic cavitation process by high-speed camera, the taper cavitation area is formed on the end face of the horn, and its range of action reaches more than 10mm. Cavitation drilling experiments of resin workpieces with diameters of 3 mm and 0.5 mm are carried out respectively, and it is found that the ultrasonic cavitation effect significantly improves the adhesion and entanglement of the chips to the cutter. Ultrasonic cavitation drilling experiments of stainless steel micro-holes with different spindle speeds are conducted. The entrance morphology, roundness, pore wall morphology and surface roughness of micro-holes are observed and measured by laser scanning microscopy. Compared with ordinary drilling, ultrasonic cavitation drilling reduces the aperture error by 8.5%-15.6%, the entrance roundness error decreases by 20.0%-37.8%, and the hole wall roughness decreases by 12.7%-18.6%. The results show that ultrasonic cavitation effect can effectively improve the quality and accuracy of micro-hole machining.

Key words: ultrasonic cavitation; micro-hole morphology; roundness error; surface roughness

* 国家自然科学基金(51575049)、基础科研项目(DEDPHF)和国家重点基础研究计划(2015CB059900)资助项目。20190204 收到初稿, 20190713 收到修改稿

0 前言

微孔零件广泛地应用于航空航天、船舶、动力和微电子等领域。目前微孔多采用钻削加工,而微细钻削刀具螺旋槽浅,容屑排屑空间有限,切屑容易滞留和堵塞,使得钻头受力急剧增大,容易导致钻头过早折断,同时使微孔加工质量变差。为了改善微孔钻削过程的排屑状况,通常使用在钻削过程中多次退刀排屑的方法,但是该方法使得加工效率显著降低。因此本研究提出了超声空化辅助钻削的方法,钻削过程对液体施加超声振动,利用液体中的超声空化效应改善切屑的黏滞和堵塞现象,提高微孔加工质量。

超声空化效应是指在超声振动作用下,液体中的大量微小泡核周期性地经过膨胀、压缩、再膨胀、再压缩,多次振荡之后,体积很大的空化泡最终高速溃灭的非线性过程。空泡溃灭瞬间产生高温高压,并伴有强烈的冲击波和高速微射流,引发了一系列物理、化学、机械等效应^[1-2]。

超声空化效应已经被应用于电火花加工、材料去毛刺等领域,许多学者都对空化机理及应用展开了研究。LIEW 等^[3]采用超声空化辅助电火花加工微孔,发现空化泡群的振荡可显著提高碎屑的排出速度,减少碎屑在工件表面的黏附。LIU 等^[4]通过进行超声振动辅助微细电火花加工深微孔试验,发现超声空化效应能使碎屑更容易冲洗掉,提高了超声振动辅助微细电火花加工的效率。TOH 等^[5]研究了超声空化对不锈钢铣削过程中毛刺形成与毛刺高度的影响,发现超声空化可有效降低毛刺的高度。XU 等^[6-7]进行超声-化学机械抛光蓝宝石试验,发现空化效应产生了很强的爆破压力,反复作用在工件表面的压力使得材料去除率提高,工件表面平整度误差降低。叶林征等^[8-9]通过 SPH-FEM 耦合方法分析了珩磨空泡溃灭微射流的冲击特性,通过正交试验发现在合适的参数下,空化珩磨工件表面质量提高。诸多研究表明超声空化辅助加工具有良好的工艺特性,然而,目前将超声空化应用于不锈钢等难加工材料微细钻削过程的研究较少,亟待进一步探索。

本研究将超声空化应用于微细钻削过程,利用超声空化效应加速切屑排出。首先对超声空化辅助钻削原理进行分析,通过树脂钻削试验观察超声空化作用,通过进行不同主轴转速条件下的不锈钢钻削试验研究超声空化对微孔钻削质量的作用规律。

1 超声空化辅助钻削原理

超声空化辅助钻削加工示意图如图1所示。空泡溃灭时形成高速的微射流冲向壁面,空泡溃灭至最小尺寸开始反弹时产生强烈的冲击波,两者协同作用可产生数百甚至上千个大气压的瞬间高压^[10],在连续不断的瞬间高压作用下,可以减少切屑对钻头的黏附,加速切屑排出,进而改善钻削性能。

图1 空化辅助钻削加工示意图

1.1 空泡溃灭微射流机理分析

超声波经由超声波发生器、换能器和变幅杆传到液体中,液体中存在的空化核以及超声波负压相构成了空化现象产生的两个必要条件。在空泡溃灭早期,远离壁面一侧的空泡自由界面收缩较快,空泡从远离壁面一侧向底部凹陷并最终贯穿,同时产生一束垂直射向壁面的高速微射流。由于空化过程的复杂性及随机性,无法得到微射流速度的精确数值,PLESSET 和 CHAPMAN 给出微射流速度 v 的估算公式^[11]

$$v = 8.97 \left(\frac{H}{R_0} \right)^2 \sqrt{\frac{P_\infty - P_v}{\rho}} \quad (1)$$

式中, H 为空泡中心距壁面距离; R_0 为空泡初始半径; ρ 为液体密度, P_v 为泡内饱和蒸汽压,当液体为水时, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $P_v = 2.38 \times 10^3 \text{ Pa}$; P_∞ 为环境压力,不考虑微钻头对液体压力时,有

$$P_\infty = P_0 + P_a \sin \omega t \quad (2)$$

式中, P_0 为标准大气压; P_a 为声压幅值, $\omega = 2\pi f$ 。当超声频率和振幅分别为 18 kHz 和 $0.8 \text{ } \mu\text{m}$ 时, P_∞ 约为 237 kPa 。由于空化钻削中主要为近壁空化,假设 $H = R_0$,由式(1)计算出微射流速度最大可以达到 137 m/s 。

超声空化钻削过程中,空泡溃灭产生的高速微射流冲击到材料表面会产生水锤压力^[9]

$$P_w = \rho c v \quad (3)$$

式中, P_w 为水锤压力; c 为水中声速,约为 1500 m/s 。

由式(3)计算出水锤压力最大可达 205 MPa。空化射流束的直径很小, 因此很容易作用于内腔、盲孔和狭缝区域, 加工过程中会有大量微射流冲击到材料表面上, 高速微射流的水锤作用能够加速切屑排出, 同时, 强烈的冲击作用会压实材料微观表面, 而其剪切作用有助于去除材料表面微小凸起, 能够提高材料表面质量。

1.2 空泡溃灭冲击波机理分析

设液体静压力为 P_0 , 气泡膨胀到最大半径 R_m 后, 由于周围液体的压缩开始收缩, 半径收缩至 R 溃灭。当 R 趋近于 0 时, 可以得到空泡完全溃灭所需的时间 τ 为^[12]

$$\tau = 0.914 \ 68 R_m \sqrt{\frac{\rho}{P_0}} \quad (4)$$

当 $P_0=0.1$ MPa, ρ 为 $1\ 000\text{ kg/m}^3$, $R_m=100\text{ }\mu\text{m}$ 时, 得到空泡完全溃灭所需的时间约为 $9\text{ }\mu\text{s}$ 。并且在距离空泡中心为 $1.587R_m$ 处时产生的最大压强 P_m 可达到

$$P_m = P_0 4^{\frac{4}{3}} \left(\frac{R_m}{R} \right)^3 \quad (5)$$

由式(5)计算可知, 在空泡完全溃灭前, 泡内压力已经变得非常大, 当空泡溃缩至 $R=1/30R_m$ 时, 最大压强可达 425 MPa。整个钻削过程中会有大量的空化泡溃灭, 因此能产生巨大作用加速切屑排出。

1.3 空化加速切屑排出机理

假设在刀具切削作用下, 切屑已与母体工件分离但尚未排出。对切屑竖直方向受力情况进行简化分析, 如图 2 所示, 切屑受到上部切削液产生的压力 p_a , 切屑与工件底部间流体的压力 p_b , 切屑自身重力为 w , 切屑与刀具和孔壁的摩擦力为 F_f 。为了使切屑能够顺利排出微孔, 则必须提供给切屑一个最小竖直载荷 T , 即

$$T = p_a + w + F_f - p_b \quad (6)$$

图 2 切屑竖直方向受力

超声空化辅助钻削过程中, 当液体中的空化泡溃灭时, 对切屑产生冲击力 Δp , 使得切屑所受的总压力 $(p_a + w + F_f - p_b - \Delta p)$ 减小。当大量空化泡溃灭产生很强的冲击力, 使得 $(p_a + w + F_f - p_b - \Delta p)$ 小于零时,

切屑竖直方向所受的合力向上, 此时切屑一旦产生就可以顺利排出。因此超声空化可以减少微孔钻削过程切屑的滞留和堵塞, 进而提高钻削质量。

1.4 超声空化效应的机械作用

超声波在流体中间以弹性波的形式传播, 超声振动使流体中质点的位移、速度和加速度发生高频周期性的变化, 流体中的质点所受的压力急剧变化, 从而增加了对流体的机械扰动作用, 强化了其中能量、热量和动量的传递速率。

变幅杆端面产生超声振动, 则变幅杆端面和工件表面的距离 h 可表示为

$$h = h_0 + A \sin(2\pi f t) \quad (7)$$

式中, h_0 为端面和工件表面的初始距离; A 为超声振幅, f 为超声频率。

对距离 h 二次求导得到液体质点的加速度 a 为:

$$a = -4\pi^2 f^2 A \sin(2\pi f t) \quad (8)$$

由式(8)可知, 当超声振幅为 $2\text{ }\mu\text{m}$, 频率为 26 kHz 时, 液体质点加速度变化范围达到了 $\pm 53\ 321\text{ km/s}^2$ 。在加工过程中, 液体质点运动速度和加速度急剧变化, 液体高速流动, 有利于排屑, 进而可以减少切屑堵塞和刀具黏结磨损。

2 树脂超声空化钻削试验

通过加工透明的树脂材料观察钻削过程中的超声空化作用, 树脂钻削试验装置如图 3 所示。钻削过程中, 使超声空化装置端部对准钻削加工区域, 使高速摄像机对焦在钻头刀尖处, 实时采集图像。分别在转速 3 000 r/min、进给速度 15 mm/min 和转速 14 000 r/min、进给速度 28 mm/min 的条件下, 在树脂材料上加工直径 3 mm、深度 6 mm 和直径 0.5 mm、深度 1 mm 的孔。两组试验中空化装置变幅杆的振动频率和幅值相同, 分别为 18 419 Hz、 $0.8\text{ }\mu\text{m}$, 超声功率均为 50 W, 空化液体均为水。

图 3 空化钻削树脂试验装置

2.1 超声变幅杆端面空化现象

观察变幅杆端面, 可以看到形成了 CBS 空化结构(cone-like bubble structure)。声场中的空泡主要受到两种力的作用: 主 Bjerknes 力、二阶 Bjerknes 力。其中, 主 Bjerknes 力是超声波对空泡的直接作用力, 而二阶 Bjerknes 力是各个空泡之间的相互作用力^[13]。通常情况下, 主 Bjerknes 力远大于二阶 Bjerknes 力。张虎等^[14]认为 CBS 结构的形成与主 Bjerknes 力有关。当声压幅值升高时, 主 Bjerknes 力会改变方向, 导致吸引空泡的高压区域变成了排斥区域。由于主 Bjerknes 力的排斥作用, 空泡不能进入这一区域, 而是绕着主 Bjerknes 力不存在的区域通过。当空泡远离辐射面时, 排斥区域的范围随之减小, 因此空泡能够到达的区域最终形成了一个圆锥型的区域。

通过观察图 4 可以看出锥型空化结构作用范围达到 10 mm 以上, 因此能够作用于微孔附近, 对微细钻削过程产生有利作用。

图 4 变幅杆端面的超声空化现象

2.2 直径 3 mm 孔的钻削过程

如图 5 所示, 普通钻削直径 3 mm 孔的过程中, 随着钻头向工件进给, 切屑不断变长。由于切屑难以去除, 会紧紧缠绕在钻头上, 所以钻削过程结束钻头退回原位时, 钻头上缠绕了大量切屑。而超声空化钻削过程中, 高速微射流、强烈冲击波和超声振动作用使得切屑变得松散, 钻削结束钻头退回原位时, 钻头上没有缠绕切屑。

图 5 直径 3 mm 孔的钻削过程

2.3 直径 0.5 mm 孔的钻削过程

如图 6 所示, 普通钻削直径 0.5 mm 孔的过程中, 钻削过程结束钻头退回原位时, 钻头上缠绕了大量切屑。而超声空化钻削过程, 空化效应及时改善了排屑性能, 钻头上始终保持洁净、没有缠绕和黏附切屑。

图 6 直径 0.5 mm 孔的钻削过程

3 不锈钢超声空化钻削试验

3.1 试验装置

在五轴高速加工中心(DMU80 mono BLOCK)上进行超声空化钻削和普通钻削试验, 机床主轴最高转速为 22 000 r/min。钻削试验前, 通过阻抗分析仪和多普勒测振仪(Polytec OFV-505)测量得到超声空化装置变幅杆的振动频率和幅值分别为 18 419 Hz、0.8 μm 。变幅杆端部直径为 20 mm, 其超声发射面积约为 3.14 cm^2 , 则超声强度约为 16 W/cm^2 。空化液体为水, 纯水的理论空化阈值很高, 而一般实际液体中会存在溶解的气体或杂质颗粒, 当水中存在微小空化泡核、空泡初始半径为 1 μm 时, 水的空化阈值约为 0.69 W/cm^2 , 远小于超声空化装置产生的超声强度, 认为可产生强烈的瞬态空化。

3.2 试验材料

工件为难加工材料 304 不锈钢, 工件尺寸为 100 mm $\times$ 40 mm $\times$ 5 mm。刀具为直径 0.5 mm 的硬质合金钻头。

3.3 试验方案

钻削试验装置如图 7 所示, 试验参数见表 1。

工件通过螺栓固定在液体槽底部, 首先对工件表面铣削, 获得平面度和表面粗糙度良好的表面。钻削过程中, 在液体槽中添加一定深度的水, 使得工件和变幅杆端部完全浸没在水中。水中有大量的空化核, 利于产生空化。将变幅杆端面对准钻削区域, 尽量减小其与刀具的距离, 以增大超声空化对钻削过程的作用强度。为了减少刀具结构参数对试验结果的干扰, 同一切削参数下, 普通钻削和空化钻削采用同一把刀具, 即每隔 1 个孔交替进行钻削, 直至刀具折断。通过控制超声电源的开关实现两种钻削方式的转换。

图 7 空化辅助钻削试验装置

表 1 超声空化钻削试验参数

参数	数值
超声空化频率/Hz	18 419
超声波功率/W	50
主轴转速/($\times 10^3$ r/min)	6, 8, 10, 12
进给速度/(μ m/r)	2
刀具直径/mm	0.5
孔深/mm	0.5
液体	水

4 试验结果分析与讨论

4.1 切屑黏附现象

主轴转速为 12 000 r/min、进给速度为 2 μ m/r 时, 普通钻削和超声空化钻削后的微细刀具黏屑状况如图 8 所示。可以看出, 当钻削完成微钻退回原位时, 普通钻削的钻头后刀面和螺旋槽上黏附和缠绕了大量的切屑, 这些切屑在钻削过程不能顺利排出, 因而随着钻头一起旋转, 严重挤压刮擦孔壁, 增大刀具磨损, 也会影响加工过程稳定性。而空化钻削过程中, 空泡溃灭产生的高速微射流、强烈冲

(a) 普通钻削

(b) 超声空化钻削

图 8 钻削加工后刀具黏屑现象

击波作用能够减少切屑与刀具前刀面、后刀面的滞留和黏结, 加速切屑排出, 因此空化钻削后的刀具上并没有黏附切屑。

4.2 微孔形貌

图 9 是通过三维激光扫描显微镜(Keyence VK-X100)拍摄观察得到的不同主轴转速条件下, 普通钻削和空化钻削的微孔形貌。

图 9 微孔形貌

从图 9 可以看出, 普通钻削过程中, 由于切屑不能及时排出, 使得刀具高速旋转过程受阻, 微细钻头产生弯曲变形和不规则摆动, 严重影响了微孔形貌。主轴转速较低即为 6 000 r/min、8 000 r/min、10 000 r/min 时, 第 11 个孔形貌急剧恶化, 并且孔径明显增大。随着主轴转速升高, 微细钻削性能更差, 当转速为 12 000 r/min 时, 加工至第 7 个孔即出现了孔形貌恶化现象。这是由于转速升高使得刀具单位时间内去除更多工件材料, 切屑生成速度增大, 而切屑在螺旋槽中流动速度较缓慢, 使得切屑堵塞更严重。

与普通钻削相比, 空化钻削改善了切屑排除效果, 减少了切屑与刀具、工件之间的摩擦。加工至第 11 个孔时, 微孔仍具有较好的表面形貌。并且主轴转速为 12 000 r/min 时, 空化钻削也取得了良好的效果, 因此空化钻削可以采用较高的转速, 以提

高钻削效率。

4.3 微孔直径和圆度误差

微孔直径和圆度误差是表征微孔质量的重要参数,因此对普通钻削和空化钻削微孔的入口圆度和平均直径进行定量分析。采用的圆度评价方法如图 10 所示,沿 0° 、 45° 、 90° 、 135° 这四个方向测量孔的直径,用四个测量直径的最大偏差表示微孔圆度误差。微孔平均直径通过对四个测量直径求平均值得到。

图 10 圆度误差评价方法

图 11 和图 12 显示了不同转速条件下,普通钻削和空化钻削微孔的平均直径和圆度误差,标准差数值代表着钻削过程孔径和圆度误差的波动情况。可以看出普通钻削过程中,随着转速升高,孔径和圆度误差都呈现增大趋势,并且孔径恒大于 $520\ \mu\text{m}$,圆度误差大于 $2\ \mu\text{m}$,标准差数值也较大。转速为 $10\ 000\ \text{r/min}$ 时,圆度误差达到 $4\ \mu\text{m}$ 以上。普通钻削微孔的尺寸精度和一致性差,主要是由于切屑容易堵塞螺旋槽,导致微细刀具的弯曲变形和摆动增大,使得微孔精度变差。同时,切屑随刀具高速旋转的过程中划擦孔壁产生大量热量,工件受热膨胀造成过切,使得孔径增大。

图 11 普通钻削和空化钻削的微孔直径

空化钻削过程中,随转速升高,孔径和圆度误差呈缓慢上升趋势。与普通钻削相比,孔径精度、圆度误差及其波动都有改善,孔径误差降低了 $8.5\%\sim 15.6\%$,圆度误差降低了 $20.0\%\sim 37.8\%$ 。尤其在转速为 $10\ 000\ \text{r/min}$ 时,空化辅助钻削使得孔

径误差从 $22.5\ \mu\text{m}$ 降到 $17.5\ \mu\text{m}$,圆度误差从 $4.5\ \mu\text{m}$ 降到 $2.5\ \mu\text{m}$ 。空化辅助钻削主要是利用超声空化效应,液体中大量空泡溃灭的微冲击和微射流作用,加速了切屑排出,减小了微细刀具的变形和不规则摆动,改善了加工稳定性和微孔加工精度。

图 12 普通钻削和空化钻削的圆度误差

4.4 微孔孔壁形貌

利用电火花线切割方法将微孔剖开,通过三维激光扫描显微镜(Keyence VK-X100)观察普通钻削和空化钻削的孔壁三维形貌。通过对孔壁的观察可知,普通钻削过程存在一个临界点,该临界点之前的微孔形貌保持良好,该临界点之后的微孔形貌急剧恶化。对临界点阶段的微孔形貌进行分析,即第 9、11 个孔($n=6\ 000\ \text{r/min}$ 、 $8\ 000\ \text{r/min}$ 、 $10\ 000\ \text{r/min}$)和第 7、9 个孔($n=12\ 000\ \text{r/min}$)。

由图 13 可知,转速为 $6\ 000\ \text{r/min}$ 时,普通钻削和空化钻削孔壁形貌良好。转速为 $8\ 000\ \text{r/min}$ 时,普通钻削和空化钻削第 9 个孔壁具有良好的形貌,但是普通钻削第 11 个孔出现了微凸台,这是由于钻削过程,切屑不能及时排出,造成螺旋槽堵塞,刀具产生不规则摆动,影响到孔壁形貌。转速升高到 $10\ 000\ \text{r/min}$ 和 $12\ 000\ \text{r/min}$ 时,切屑生成速度更快,而微细钻削排屑困难,因此空化辅助钻削效果更为明显。如图 13e、13g 所示,普通钻削孔壁出现了明显的阶梯,严重影响微孔质量和使刀具过早失效;而如图 13f、13h 所示,空化钻孔呈喇叭状,并没有在孔壁形成大的台阶,这主要是由于超声空化效应产生了大量的空泡,空泡溃灭时产生强烈的冲击和微射流,能够减少切屑与刀具的黏滞,使得切屑及时排出,进而改善了钻削孔壁质量。

4.5 孔壁粗糙度

通过基恩士分析软件测量线切割后的孔壁粗糙度,对前 7 个孔的孔壁线粗糙度取平均值。图 14 为普通钻削和空化钻削的孔壁粗糙度。转速为 $6\ 000$

(a) 普通钻削($n=6\ 000$ r/min) (b) 空化钻削($n=6\ 000$ r/min) (c) 普通钻削($n=8\ 000$ r/min) (d) 空化钻削($n=8\ 000$ r/min) (e) 普通钻削($n=10\ 000$ r/min) (f) 空化钻削($n=10\ 000$ r/min) (g) 普通钻削($n=12\ 000$ r/min) (h) 空化钻削($n=12\ 000$ r/min)

图 13 孔壁形貌

r/min 时, 空化钻削孔壁粗糙度约为 $0.9\ \mu\text{m}$, 而普通钻削粗糙度大于 $1.1\ \mu\text{m}$ 。随着主轴转速升高, 普通钻削粗糙度增幅更大。转速为 $12\ 000\ \text{r/min}$ 时, 普通钻削粗糙度为 $1.35\ \mu\text{m}$, 而空化钻削使孔壁粗糙度降到 $1.0\ \mu\text{m}$ 。不同主轴转速下, 空化钻削孔壁粗糙度均低于普通钻削, 使孔壁粗糙度降低了 $12.7\%\sim 18.6\%$, 并且粗糙度数值波动更小。

图 14 普通钻削和空化钻削的孔壁粗糙度

超声空化效应改善了空化钻削过程中孔壁的粗糙度。普通钻削过程, 排屑困难, 切屑容易滞留在螺旋槽中, 随钻头高速旋转的过程中摩擦和划擦孔壁, 严重影响钻削孔壁质量。空化钻削过程, 空泡溃灭产生强烈的冲击作用, 加速了切屑排出, 减少了切屑对孔壁的划擦作用。

5 结论

(1) 在超声空化钻削过程中, 液体中大量空泡溃灭, 产生强大的冲击力, 并且液体质点运动速度和加速度急剧变化, 均可促进切屑排除, 进而减少切屑堵塞和刀具黏结磨损。

(2) 超声变幅杆端面形成了锥型空化区域, 其作用范围能够达到 $10\ \text{mm}$ 以上。直径 $3\ \text{mm}$ 和 $0.5\ \text{mm}$ 的树脂工件钻削过程中, 超声空化效应均显著改善了切屑对刀具的黏附和缠绕现象。

(3) 超声空化效应能够有效提高不锈钢微孔加工质量, 提高孔径精度, 减小圆度误差。与普通钻

削相比,空化钻削的孔径误差降低了 8.5%~15.6%,圆度误差降低了 20.0%~37.8%,孔壁粗糙度降低了 12.7%~18.6%。

参 考 文 献

- [1] LAUTERBORN W, KURZ T, GEISLER R, et al. Acoustic cavitation bubble dynamics and sonoluminescence[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2007, 14(4): 484-491.
- [2] 莫润阳, 林书玉, 王成会. 超声空化的研究方法及进展[J]. *应用声学*, 2009, 28(5): 389-400.
MO Runyang, LIN Shuyu, WANG Chenghui. Methods of study on sound cavitation[J]. *Applied Acoustics*, 2009, 28(5): 389-400.
- [3] LIEW P J, YAN J, KURIYAGAWA T. Fabrication of deep micro-holes in reaction-bonded SiC by ultrasonic cavitation assisted micro-EDM[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 76(1): 13-20.
- [4] LIU K, YASUTOMO K, DING X, et al. Ultrasonic vibration assisted electro-discharge machining of deep micro holes[C]// The 6th International Conference European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (EUSPEN 2006), 2006.
- [5] TOH C K. The use of ultrasonic cavitation peening to improve micro-burr-free surfaces[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 31(7-8): 688-693.
- [6] XU W, LU X, PAN G, et al. Effects of the ultrasonic flexural vibration on the interaction between the abrasive particles; pad and sapphire substrate during chemical mechanical polishing (CMP)[J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(7): 2905-2911.
- [7] XU W, LU X, PAN G, et al. Ultrasonic flexural vibration assisted chemical mechanical polishing for sapphire substrate[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(12): 3936-3940.
- [8] 叶林征, 祝锡晶, 王建青, 等. 基于 SPH-FEM 的超声珩磨空化微射流冲击研究[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(13): 72-77.
YE Linzheng, ZHU Xijing, WANG Jianqing, et al. Cavitation micro-jet impact in ultrasonic honing based on SPH-FEM[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(13): 72-77.
- [9] 祝锡晶, 叶林征. 功率超声珩磨空化试验分析[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(19): 136-142.
ZHU Xijing, YE Linzheng. Analysis of power ultrasonic honing cavitation test[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(19): 136-142.
- [10] 张汉辰, 陈红玲, 杨胜强, 等. 超声空化去毛刺的理论分析及数值仿真[J]. *应用声学*, 2015, 34(2): 119-124.
ZHANG Hanchen, CHEN Hongling, YANG Shengqiang, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of ultrasonic cavitation deburring[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2015, 34(2): 119-124.
- [11] PLESSET M S, CHAPMAN R B. Collapse of an initially spherical vapour cavity in the neighbourhood of a solid boundary[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1970, 47(2): 283-290.
- [12] RAYLEIGH. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity[J]. *Philosophical Magazine*, 1917, 34(199-04): 94-98.
- [13] 沈壮志. 声驻波场中空化泡的动力学特性[J]. *物理学报*, 2015, 64(12): 288-295.
SHEN Zhuangzhi. Dynamical behaviors of cavitation bubble under acoustic standing wave field[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(12): 288-295.
- [14] 张虎, 王秋萍, 吴迎春, 等. 超声空化泡初期结构及其声场模拟研究进展[C]// 中国声学学会 2005 年青年学术会议, 2005.
ZHANG Hu, WANG Qiuping, WU Yingchun, et al. Advance of research work in the original structures of ultrasonic cavitation bubbles and modeling of pressure fields[C]//Chinese Academy of Acoustics Youth Academic Conference, 2005.

作者简介: 梁志强(通信作者), 男, 1984 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要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技术。

E-mail: liangzhiqiang@bit.edu.cn

马悦, 女, 1996 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为超声辅助钻削、微细钻削。

E-mail: 15546108005@163.com

聂倩倩, 女, 1994 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为难加工材料超声空化与超声振动复合钻削方法。

E-mail: nieqianqian@bit.edu.cn