DOI: 10.3901/JME.2021.07.244

横刃修磨高长径比微细钻削刀具的钻削性能研究*

梁志强^{1,2} 马悦² 陈建军³ 李玉³ 马丹³
曹宇轩³ 蔡荣宾⁴ 郭海新² 王西彬²

- (1. 北京理工大学医工融合研究院 北京 100081;
2. 北京理工大学先进加工技术国防重点学科实验室 北京 100081;
3. 山西柴油机工业有限责任公司 大同 037036;
4. 中国航发南方工业有限公司 株洲 412002)

摘要: 横刃修磨方法是一种提高钻削刀具加工性能的有效手段。针对横刃修磨高长径比微钻,建立了刀具螺旋槽、非共轴螺旋后刀面和十字型横刃的数学模型,并基于六轴数控工具磨床刃磨制备出直径0.5 mm、长径比为10的横刃修磨高长径比非共轴螺旋后刀面微钻。在304不锈钢材料上开展了普通高长径比微钻和横刃修磨高长径比微钻的对比钻削试验研究,从钻削力、刀具磨损、微小深孔加工质量等方面分析了横刃修磨对高长径比微细钻削刀具钻削性能的影响。结果表明,与普通高长径比微钻相比,横刃修磨高长径比微钻的钻削轴向力和钻尖磨损程度明显降低,在钻削5个微小深孔后,横刃修磨高长径比微钻的后刀面和横刃的最大磨损宽度分别减小了26%和32%;横刃修磨高长径比微钻所加工的微小深孔具有更规则的入口形状、更低的圆度误差和孔壁粗糙度。研究证实了横刃修磨方法能够显著提高高长径比微钻的钻削性能。

关键词: 微小深孔; 高长径比微钻; 横刃修磨; 刀具刃磨; 钻削性能

中图分类号: TG713

Research on Drilling Performance of High-aspect-ratio Micro-drill with Thinned Chisel Edge

LIANG Zhiqiang^{1,2} MA Yue² CHEN Jianjun³ LI Yu³ MA Dan³
CAO Yuxuan³ CAI Rongbin⁴ GUO Haixin² WANG Xibin²

- (1. Institute of Engineering Medicine, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;
2. Key Laboratory of Fundamental Science for Advanced Machining,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;
3. Shanxi Diesel Engine Industry Co., Ltd., Datong 037036;
4. AECC South Industry Co., Ltd., Zhuzhou 412002)

Abstract: Chisel edge thinning is an efficient means to improve the machining performance of drilling tools. As for the high-aspect-ratio micro-drill with thinned chisel edge, the mathematics models of helical flute, non-coaxial helical flank and cross-shaped chisel edge are established, and the micro-drills with diameter of 0.5 mm and aspect ratio of 10 are fabricated by a six-axis CNC grinding machine. The comparative drilling experiment is carried out on 304 stainless steel using high-aspect-ratio micro-drills with and without thinned chisel edge, and the influence of chisel edge thinning on the drilling performance of high-aspect-ratio micro-drill is analyzed from the aspects of thrust force, tool wear and machining quality of micro deep hole. The results show that the thrust force and drill tip wear of the high-aspect-ratio micro-drill with thinned chisel edge are dramatically reduced compared to the ordinary micro-drill. After drilling five micro deep holes, the maximum wear width of the drill flank and chisel edge of high-aspect-ratio micro-drill with thinned chisel edge is reduced by 26% and 32%, respectively. And the micro deep holes obtained by the micro-drill with thinned chisel edge, have better entrance shape, lower micro-hole roundness and hole-wall

* 国家重点研发计划(2019YFB1311100)、国家自然科学基金(51975053)和基础科研项目(DEDZF)资助项目。20200716收到初稿,20210210收到修改稿

roughness. It is demonstrated that the chisel edge thinning method can significantly improve the drilling performance of high-aspect-ratio micro-drill.

Key words: micro deep hole; high-aspect-ratio micro-drill; chisel edge thinning; cutter grinding; drilling performance

0 前言

随着先进制造业的飞速发展, 工业产品呈现集成化、微型化趋势, 航空航天、汽车、微电子、生物医疗等重要领域对微小深孔零件的需求日益增加^[1-2]。这些具有微小深孔的零件通常服役于高温、高寒、高应力等场合, 多采用钛合金、不锈钢、高强度钢等难加工材料制成^[3]。目前, 微小深孔的加工方法有多种, 其中微细钻削加工方法具有加工精度高、可加工材料范围广、材料去除率高等优点, 是实现微小深孔高效率和高精度加工的一种有效手段^[4-5]。在微小深孔的钻削加工过程中, 高长径比微细钻削刀具的强度和刚度相对较低, 自定心能力较差, 入钻过程中容易产生滑移和偏斜现象, 从而影响微孔的加工精度, 甚至导致刀具断裂; 同时, 高长径比微细钻削刀具的排屑路径较长, 切屑更加容易缠绕刀具而发生堵塞, 使钻削力和扭矩增大, 加速刀具磨损, 降低孔壁的表面质量^[6-8]。

在钻削过程中, 钻头横刃部分产生的钻削力占总钻削力的 50% 以上, 此外, 入钻时横刃起定心作用, 进而影响所钻孔的尺寸精度和形位精度。针对这些问题, 国内外学者致力于通过横刃修磨来改善钻削刀具的切削性能。SUGITA 等^[9]通过修磨钻头横刃形成附加切削刃, 设计了一种具有特殊钻芯形状的钻削刀具, 并通过钻削试验发现, 与普通刀具相比, 新型钻削刀具的钻削力降低了 20% 以上, 且所加工孔的圆度提高。WANG 等^[10]进行了 PCB 材料通孔钻削试验, 发现适当的横刃修磨可以减小刀具后刀面的切屑粘结现象和磨损程度。KO 等^[11]开展了横刃修磨钻削刀具和普通钻削刀具的对比钻削试验研究, 发现 X 型横刃可显著提高钻削刀具的断屑能力, 抑制孔口毛刺的形成, 提高孔的加工质量。郭永杰等^[12]对深孔麻花钻的横刃进行修磨, 并通过开展 45 钢钻削试验研究刀具横刃几何结构参数对其钻削性能的影响, 发现增大内切削刃圆弧半径和过心量, 均可减小轴向力和扭矩, 但是增大过心量会降低孔的加工精度。除了研究横刃修磨方法在常规尺寸钻削刀具上的应用, 也有研究探索了横刃修磨对于微细钻削刀具切削性能的影响规律。GUO 等^[5,13]研究了横刃修磨对直径 0.5 mm 螺旋钻尖微钻钻削性能的影响, 发现经过横刃修磨的微钻加工出

的微小孔具有更高的加工精度和更好的孔口形貌。NANBU 等^[14]刃磨制备了直径 0.1 mm 和 0.2 mm 的 X 型横刃微细钻削刀具, 发现合适的横刃轴向前角能够显著降低微钻的钻削力、延长刀具使用寿命。

以上研究表明, 横刃修磨是一种提高钻削刀具加工性能的有效手段。但是, 随着钻头直径的减小和长径比的增加, 刀具的刚度、强度锐减, 实现高性能微细钻削刀具的刃磨制备更加困难, 而其横刃修磨难度也大幅度提高, 因此目前关于高长径比微细钻削刀具的横刃修磨及其钻削性能验证的研究较少。针对横刃修磨高长径比微细钻削刀具, 开展刀具设计、刃磨以及钻削性能验证研究。建立了横刃修磨高长径比微钻的螺旋槽、非共轴螺旋后刀面和十字型横刃的数学模型, 在此基础上, 利用六轴数控工具磨床刃磨制备出直径 0.5 mm、长径比为 10 的横刃修磨高长径比微钻。在 304 不锈钢上进行了微小深孔钻削试验, 并通过测量和分析钻削力、刀具磨损、微孔加工质量来评价所制备刀具的钻削性能。

1 横刃修磨高长径比微钻数学模型

1.1 螺旋槽数学模型

高长径比微钻的螺旋槽刃磨过程如图 1 所示, 螺旋槽由单斜边砂轮和微钻之间的相对螺旋运动形成。在图 1 中, $O_w X_w Y_w Z_w$ 为单斜边砂轮坐标系; $O_d X_d Y_d Z_d$ 为微钻坐标系, 其 X_d 轴平行于 X_w 轴, Z_d 轴与 Z_w 轴的夹角为砂轮偏置角度 λ , 微钻中心与砂轮中心之间的偏移距离为 a_x ; $O_m X_m Y_m Z_m$ 为微钻的动态坐标系, 随着刀具的螺旋运动而动态变化。螺旋槽截面轮廓是通过加工轨迹包络形成的, 基于 ZHANG 等^[15]对钻头螺旋槽的几何建模过程, 可以获得加工轨迹的表达式为

$$R_m(u, \alpha) = \begin{pmatrix} X_{pm}(u, \alpha) \\ Y_{pm}(u, \alpha) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{pd} \cos(-2Z_{pd} \tan(\beta_0)/d) - Y_{pd} \sin(-2Z_{pd} \tan(\beta_0)/d) \\ X_{pd} \sin(-2Z_{pd} \tan(\beta_0)/d) + Y_{pd} \cos(-2Z_{pd} \tan(\beta_0)/d) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} X_{pd} \\ Y_{pd} \\ Z_{pd} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R(u) \cos \alpha + a_x \\ R(u) \sin \alpha \cos \lambda - u \sin \lambda \\ R(u) \sin \alpha \sin \lambda + u \cos \lambda \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, $R(u)$ 为砂轮外轮廓面上任意一点 P 的半径; u 为该点与 $X_w O_w Y_w$ 面的距离; α 为该点与 X_w 轴的夹角; d 和 β_0 分别为微钻的直径和螺旋角。

图1 高长径比微钻的螺旋槽刃磨过程

参数 u 和 α 取不同值时可确定微钻横截面内的一系列加工轨迹, 这些加工轨迹包络形成螺旋槽的横截面形状, 如图2所示。在刀具坐标系 $O_d X_d Y_d Z_d$ 中, 计算出螺旋槽轮廓的数值解后, 通过三次样条插值法获得螺旋槽截面轮廓方程。由于螺旋槽截面轮廓作螺旋运动形成螺旋槽曲面, 所以高长径比微钻的螺旋槽 F_0 数学表达式可以表示为

$$\begin{cases} X_d = w \cos v - f_H(w) \sin v \\ Y_d = w \sin v + f_H(w) \cos v \\ Z_d = z_c + dv/2 \tan \beta_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, w 和 v 是螺旋槽的表面形状参数; z_c 为刀具外缘转点 C 在刀具坐标系 $O_d X_d Y_d Z_d$ 中的坐标值。

图2 高长径比微钻的螺旋槽截面形状

1.2 后刀面数学模型

相比于平面后刀面和锥面后刀面, 非共轴螺旋后刀面微钻能有效降低钻削轴向力和刀具磨损, 提高刀具的定心能力, 改善微小孔入口形貌。因此, 本研究将非共轴螺旋后刀面应用于高长径比微钻, 其数学模型如图3所示。在微细钻削刀具坐标系 $O_d X_d Y_d Z_d$ 中, 其原点 O_d 位于钻尖中心处, Z_d 轴沿刀

具轴线方向, X_d 轴和 Y_d 轴方向使外缘转点 C 的 Y 轴坐标满足 $y_c = -t$, $2t$ 为芯径厚度。点 M 为后刀面与钻削刀具圆柱面的交线上任意一点, 点 D 为 Z_H 轴与 Z_d 轴的交点。 $O_H X_H Y_H Z_H$ 为非共轴螺旋面坐标系, $O_H M$ 围绕 Z_H 轴作螺旋运动形成非共轴螺旋后刀面, 其在 $O_d X_d Y_d Z_d$ 坐标系中的方程可表示为^[16]:

$$\begin{aligned} F_1: & Z_d \cos \phi - B \frac{\sin \phi}{\tan \theta} + X_t \sin \phi + \\ & \frac{\sqrt{[X_t \cos \phi - \sin \phi (Z_d + B)]^2 + Y_t^2}}{\tan \theta} + \\ & \frac{H}{2\pi} \arcsin \left(\frac{Y_t}{\sqrt{[X_t \cos \phi - \sin \phi (Z_d + B)]^2 + Y_t^2}} \right) = 0 \quad (3) \end{aligned}$$

$$X_t = X_d \cos \beta - Y_d \sin \beta$$

$$Y_t = Y_d \cos \beta + X_d \sin \beta$$

式中, $\theta, \beta, \square, B, H$ 是微钻后刀面的刃磨参数; $\square$ 为 Z_H 轴和 Z_d 轴之间的夹角; β 为 X_H 和 X_d 之间的夹角; B 为钻尖中心点 O_d 和点 D 之间的距离; H 为非共轴螺旋面节距; θ 为 $O_H M$ 和 Z_H 轴之间的夹角。将 $X_d = -X_d, Y_d = -Y_d, Z_d = Z_d$ 代入式(3), 可以得到非共轴螺旋后刀面 $F_2(X_d, Y_d, Z_d) = 0$ 的方程。

图3 高长径比微钻的非共轴螺旋后刀面数学模型

1.3 横刃前刀面数学模型

钻削刀具横刃形状主要有无横刃、十字型横刃、杯型横刃、H型横刃、SE横刃和群钻横刃等, 其中十字型横刃具有较强的定心能力和断屑能力且刃磨方法相对简单, 被广泛应用于微细钻削刀具中, 因此本文中的高长径比微钻的横刃形状采取十字型横刃。由于横刃为后刀面 F_1 与 F_2 相交形成的刃口, 因此横刃在刀具坐标系 $O_d X_d Y_d Z_d$ 中的表达式 L_0 可以通过联立后刀面 F_1 与 F_2 的表达式获得^[13]

$$\begin{aligned}
& \frac{2X_t \sin \phi + \sqrt{[X_t \cos \phi - \sin \phi (Z_d + B)]^2 + Y_t^2}}{\tan \theta} \\
& - \frac{\sqrt{[X_t \cos \phi + \sin \phi (Z_d + B)]^2 + Y_t^2}}{\tan \theta} \\
& \frac{H}{2\pi} \left\{ \arcsin \left(\frac{Y_t}{\sqrt{[X_t \cos \phi - \sin \phi (Z_d + B)]^2 + Y_t^2}} \right) + \right. \\
& \left. \arcsin \left(\frac{Y_t}{\sqrt{[X_t \cos \phi + \sin \phi (Z_d + B)]^2 + Y_t^2}} \right) \right\} = 0
\end{aligned} \quad (4)$$

在刀具坐标系 $O_d X_d Y_d Z_d$ 中, 高长径比微钻横刃修磨数学模型如图 4 所示。内切削刃前刀面 F_3 是一个平面, 其与横刃相交于点 $Q(x_q, y_q, z_q)$, 与主切削刃相交于点 $W(x_w, y_w, z_w)$, 因此线段 QW 为内切削刃。横刃的长度为 l_1 , 主切削刃的长度为 l_2 , 横刃轴向前角为 δ 。将横刃长度 l_1 代入式(4)可获得点 $Q(x_q, y_q, z_q)$ 坐标, 将主切削刃长度 l_2 代入式(2)与(3)可获得点 $W(x_w, y_w, z_w)$ 坐标。通过点 $Q(x_q, y_q, z_q)$ 、点 $W(x_w, y_w, z_w)$ 以及横刃轴向前角 δ 可求得内切削刃前刀面 F_3 的表达式

$$aX_d + bY_d + cZ_d + e = 0 \quad (5)$$

式中, 系数 a, b, c, e 可通过横刃长度 l_1 、主切削刃长度 l_2 和横刃轴向前角 δ 确定。

图 4 高长径比微钻的横刃修磨数学模型

2 横刃修磨高长径比微钻刃磨制备

基于牧野精机六轴数控工具磨床(CNS7d, Makino Seiki)对横刃修磨高长径比微细钻削刀具进行精密磨削制备, 如图 5 所示。横刃修磨高长径比微钻的刃磨制备过程主要包括螺旋槽刃磨、后刀面

刃磨和横刃修磨三个加工工序, 其中螺旋槽刃磨和横刃修磨过程使用单斜边砂轮完成, 后刀面刃磨使用平行砂轮完成。两种砂轮均为陶瓷结合剂的金刚石砂轮, 粒度均为 2 000 目(6.5 μm)。刀具刃磨时全程采用磨削油冷却, 砂轮的磨削速度为 24 m/s, 粗加工与精加工时的磨削深度分别为 14 μm 、2 μm , 刃磨螺旋槽时的磨削进给速度为 10 mm/s, 刃磨后刀面与修磨横刃时的磨削进给速度为 2 mm/s。高长径比微钻材料选用德国钴领公司所生产的 K55SF 牌号硬质合金, 其材料成分如表 1 所示。

图 5 牧野精机六轴数控工具磨床

表 1 K55SF 硬质合金材料成分和特性

属性	数值	属性	数值
WC 质量分数(%)	91	密度/(g/cm ³)	14.1
Co 质量分数(%)	9	硬度 HV/(N/mm ²)	1 920
晶粒尺寸/ μm	0.2~0.5	类别	K40/50

基于梁志强等^[17-18]提出的微细钻削刀具数控刃磨方法, 设计数控刃磨程序, 并使用刃磨仿真软件 MSPS-II(Makino Seiki Programming System II)对刀具刃磨制备过程进行仿真验证, 最终刃磨制备出直径为 0.5 mm、长径比为 10 的具有十字型横刃的高长径比微钻。通过基恩士三维激光扫描显微镜(VK-X100, Keyence)和蔡司连续变倍体视显微镜(V12, Zeiss)对刃磨制备出的高长径比微钻进行观察和测量, 普通高长径比微钻和横刃修磨高长径比微钻的刃磨结果如图 6 所示。高长径比微钻的整体结构示意图和几何结构参数分别如图 7 和表 2 所示。

(a) 普通高长径比微钻 (b) 横刃修磨高长径比微钻

图 6 高长径比微钻的刃磨结果

图 7 高长径比微钻的整体结构

表 2 高长径比微钻的几何结构参数

刀具类型	普通高长径 比微钻	横刃修磨高长 径比微钻
横刃长度 $l_1/\mu\text{m}$	140	42
主切削刃长度 $l_2/\mu\text{m}$	207	196
横刃轴向前角 $\delta/(\circ)$	—	0

刀具直径 d/mm	0.5	长径比	10
螺旋槽长度 l/mm	5	钻芯厚度 $2t/\mu\text{m}$	125
刀具整体长度 l_s/mm	50	横刃斜角 $\psi/(\circ)$	55
刀柄直径 d_s/mm	3	螺旋角 $\beta_0/(\circ)$	30
刀颈锥角 $\alpha_n/(\circ)$	10	锋角 $2\rho/(\circ)$	118

3 刀具钻削性能验证试验与分析

3.1 试验条件

为了研究所制备的横刃修磨高长径比微钻的钻削性能,在五轴数控加工中心(DMU80 monoBLOCK, DMG MORI)上进行微小深孔钻削试验,试验装置如图 8 所示。工件材料选用难加工材料 304 不锈钢,微细钻削试验参数如表 3 所示。由于所加工微孔的深径比较大,所以采用啄钻的加工方式,每步啄钻深度为 $50\ \mu\text{m}$ 。使用压电测力仪(Kistler 9257B, Kistler Instrumente AG)测量钻削过程中的轴向力,在微细钻削试验结束后,使用基恩士三维激光扫描显微镜检测刀具磨损和微小深孔的加工质量。

图 8 微细钻削试验装置

表 3 微细钻削试验参数

工艺参数	数值
主轴转速 $n/(\text{r}/\text{min})$	10 000
进给速度 $f/(\text{mm}/\text{min})$	10
微孔直径/mm	0.5
钻削深度/mm	4
啄钻步深/mm	0.05
润滑方式	水基切削液

3.2 钻削力

在上述钻削试验条件下,高长径比微钻的钻削轴向力随时间的变化趋势如图 9a 所示,其中第 80 步啄钻的轴向力信号如图 9b 所示。利用 DynoWare 软件计算每个啄钻过程中钻削稳定区域的轴向力平均值,并记为 $f_i (i \in [1, 80])$,则整个钻削过程的平均轴向力 $F_z = \sum_{i=1}^{80} f_i / 80$ 。

(a) 钻削轴向力信号

(b) 第80步啄钻的钻削轴向力信号

图 9 高长径比微钻的钻削轴向力信号

钻削轴向力随微孔数量的变化趋势如图 10 所示。随着微小深孔数量的增加,普通高长径比微钻的钻削轴向力呈增大趋势,而横刃修磨高长径比微钻的钻削轴向力显著低于普通高长径比微钻,且上升趋势更缓慢。当钻削第 5 个微小深孔时,横刃修磨高长径比微钻的钻削轴向力为 10.15 N,普通高长径比微钻的钻削轴向力为 14.91 N。相比于普通高长径比微钻,横刃修磨高长径比微钻的轴向力降低了 32%。根据 ZHANG 等^[15]提出的计算方法,高长径比微钻钻尖切削刃上各点的工作前角如图 11 所示。横刃修磨对钻头内切削刃的工作前角有明显影响,

它改变了微细钻削刀具以较大负前角的横刃挤压工件的情况, 形成内切削刃以正前角切削工件, 减少了工件材料的变形, 从而使钻削轴向力显著降低。

图 10 轴向力随孔数的变化趋势

图 11 钻尖切削刃上各点的工作前角

3.3 刀具磨损

在钻削 5 个微小深孔后, 使用超声清洗机对高长径比微钻进行清洗, 除去刀具表面附着的切屑等杂物, 然后对高长径比微钻的钻尖磨损情况进行观察和测量。两种刀具的钻尖磨损情况如图 12 所示, 可以看出普通高长径比微钻的钻尖磨损程度明显大于横刃修磨高长径比微钻。

图 12 刀具钻尖磨损形貌

为了定量地分析高长径比微钻钻尖磨损情况, 对刀具钻尖磨损宽度进行测量, 测量方法如图 13 所示, 其中 $VB_{\max}$ 为后刀面最大磨损宽度值, $C_{\max}$ 为横刃最大磨损宽度值。横刃修磨高长径比

微钻和普通高长径比微钻的钻尖最大磨损宽度测量结果如图 14 所示。由图 14 可知, 横刃修磨显著降低了高长径比微钻横刃和后刀面的最大磨损宽度。横刃修磨高长径比微钻的横刃和后刀面最大磨损宽度分别为 $8.03 \mu\text{m}$ 和 $17.94 \mu\text{m}$, 普通高长径比微钻的横刃和后刀面最大磨损宽度分别为 $11.78 \mu\text{m}$ 和 $24.11 \mu\text{m}$ 。相比于普通高长径比微钻, 横刃修磨高长径比微钻的横刃和后刀面最大磨损宽度分别减小了 32% 和 26%。通过横刃修磨, 高长径比微钻以负前角的横刃刮削挤压工件的区域减小, 以正前角的内切削刃切削工件的区域增大, 导致钻削轴向力大幅度降低, 进而显著减小刀具钻尖的磨损程度。

图 13 钻尖磨损测量方法

图 14 钻尖最大磨损宽度

3.4 微小深孔加工质量

普通高长径比微钻和横刃修磨高长径比微钻所加工的微小深孔入口形貌如图 15 所示。相比于普通高长径比微钻, 横刃修磨高长径比微钻所钻削的微小深孔具有更规则的孔口形状。为了定量分析微小深孔的入口质量, 采用图 16 所示的测量方法对微小深孔的圆度误差进行测量, 首先由六条直线确定微孔中心位置, 然后沿四个方向测量孔的直径, 每个方向相隔 45° , 用四个直径测量值的最大偏差表示微孔圆度误差。微小深孔圆度误差的测量结果如图 17 所示, 可以看出, 当钻削相同数量的孔时, 与普通高长径比微钻相比, 横刃修磨高长径比微钻所钻削的微小深孔具有更小的圆度误差。

(a) 普通高长径比微钻

(b) 横刃修磨高长径比微钻

图 15 高长径比微钻所加工微小深孔的入口形貌

图 16 圆度误差测量方法

图 17 微小深孔的圆度误差

微小深孔的入口形貌取决于刀具的定心能力。如图 18 所示,普通高长径比微钻的钻尖锋角大于横

刃修磨高长径比微钻。横刃修磨使高长径比微钻钻尖切削刃锋角变小,增强了刀具的定心能力,同时降低了高长径比微钻的磨损程度,从而改善了微小深孔的加工精度。

图 18 高长径比微钻钻尖切削刃形状

为了测量和分析微小深孔孔壁的加工质量,利用电火花线切割加工方法将微孔剖开,然后使用基恩士三维激光扫描显微镜测量微小深孔孔壁的表面形貌和粗糙度,测量结果分别如图 19 和图 20 所示。利用该仪器的图像自动连接功能,分段测量孔壁表面形貌后进行图像拼接,进而获得整个孔壁截面形貌。由图可知,横刃修磨降低了高长径比微钻所加工微小深孔的孔壁粗糙度。普通高长径比微钻和横刃修磨高长径比微钻所钻削的 5 个微小深孔孔壁粗糙度平均值分别为 $0.715 \mu\text{m}$ 和 $0.592 \mu\text{m}$ 。相比于普通高长径比微钻,横刃修磨高长径比微钻所加工的 5 个微小深孔孔壁粗糙度平均值降低了 17%。这可以归因于横刃修磨引起的高长径比微钻钻削力和钻尖磨损的降低,如第 3.2 和 3.3 节所述。

(a) 普通高长径比微钻所加工的第3个微小深孔的孔壁形貌

(a) 横刃修磨高长径比微钻所加工的第3个微小深孔的孔壁形貌

图 19 微小深孔孔壁的截面形貌

图 20 微小深孔的孔壁粗糙度

4 结论

(1) 随着所加工微小深孔数量的增加, 普通高长径比微钻的轴向力呈现增大趋势, 但横刃修磨高长径比微钻的钻削轴向力显著低于普通高长径比微钻, 而且增加趋势更缓慢。

(2) 在钻削 5 个微小深孔后, 与普通高长径比微钻相比, 横刃修磨高长径比微钻的后刀面和横刃的最大磨损宽度分别减小了 26% 和 32%, 这表明横刃修磨能够有效延缓微小深孔钻削过程中刀具的磨损速度。

(3) 与普通高长径比微钻相比, 横刃修磨高长径比微钻所加工的微小深孔具有更规则的入口形状、更低的圆度误差和孔壁粗糙度。这主要是由于横刃修磨提高了钻头的定心能力, 并使钻削轴向力和钻尖磨损程度降低, 进而提高了微小深孔的加工质量。

参 考 文 献

- [1] HASAN M, ZHAO J W, JIANG Z Y. A review of modern advancements in micro drilling techniques[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 29: 343-375.
- [2] KUMAR S P L, JERALD J, KUMANAN S, et al. A review on current research aspects in tool-based micromachining processes[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2014, 29(11-12): 1291-337.
- [3] RAHMAN Z, DAS A K, CHATTOPADHYAYA S. Micro-hole drilling through electrochemical processes: A review[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2018, 33(13): 1379-1405.
- [4] SUGANTHI X H, NATARAJAN U, RAMASUBBU N. A review of accuracy enhancement in micro-drilling operations[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1-4): 199-217.
- [5] GUO H X, WANG X B, LIANG Z Q, et al. Drilling performance of non-coaxial helical flank micro-drill with cross-shaped chisel edge[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 99(5-8): 1301-1311.
- [6] KUDAL L A. Fracture phenomena of microdrills in static and dynamic conditions[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(1): 1-12.
- [7] KIM D W, LEE Y S, PARK M S, et al. Tool life improvement by peck drilling and thrust force monitoring during deep-micro-hole drilling of steel[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(3-4): 246-255.
- [8] KUDAL L. Influence of feed motion features on small holes drilling process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 109(3): 236-241.
- [9] SUGITA N, OSHIMA M, KIMURA K, et al. Novel drill bit with characteristic web shape for high efficiency and accuracy[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2018, 67(1): 69-72.
- [10] WANG X, ZHENG X H, AN Q L, et al. Experimental investigation on drilling PCB through-holes[J]. Advanced Materials Research, 2012, 426: 56-59.
- [11] KO S L, LEE J K. Analysis of burr formation in drilling with a new-concept drill[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 113(1-3): 392-398.
- [12] 郭永杰, 贺凤宝, 胡泽朝, 等. 深孔麻花钻横刃修磨对切削性能的影响[J]. 工具技术, 2017, 51(5): 79-81.
- [12] GUO Yongjie, HE Fengbao, HU Zechao, et al. Influence of chisel edge grinding on cutting performance of deep hole twist drill[J]. Tool Engineering, 2017, 51(5): 79-81.
- [13] GUO H X, LIANG Z Q, WANG X B, et al. Influence of chisel edge thinning on helical point micro-drilling performance[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 99(9-12): 2863-2875.
- [14] NANBU Y, OCHIAI K, HORIO K, et al. Influence on rake angle of chisel edge in high-aspect-ratio microdrilling[J]. Journal of the Japan Society of Precision Engineering, 2011, 77(7): 713-717.
- [15] ZHANG S Y, WANG X B, LIANG Z Q, et al. Modeling and optimization of the flute profile of micro-drill[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(5-8): 2939-2952.
- [16] 张素燕, 梁志强, 王西彬, 等. 非共轴螺旋后刀面微钻的五轴联动刃磨方法及其钻削性能研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(19): 204-211.
- [16] ZHANG Suyan, LIANG Zhiqiang, WANG Xibin, et al. A 5-axis coordinated grinding method of non-coaxial helical flank micro-drill and its drilling performance

- research[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(19): 204-211.
- [17] 梁志强, 郭海新, 张素燕, 等. 微细钻头螺旋槽刃磨试验研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(13): 185-194.
- LIANG Zhiqiang, GUO Haixin, ZHANG Suyan, et al. Research on grinding experiment of the micro-drill flute[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(13): 185-194.
- [18] LIANG Z Q, JIAN H C, WANG X B, et al. A 5-axis coordinated CNC grinding method for the flank of a non-coaxial helical micro-drill with the cylinder grinding wheel[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1017: 654-659.
-
- 作者简介:** 梁志强(通信作者), 男, 1984 年出生, 博士, 副教授, 博士生导师。主要研究方向为先进切削磨削抛光技术、微细加工、微细刀具设计与制造、超声加工、特种机床与装备制造技术。
E-mail: liangzhiqiang@bit.edu.cn
- 马悦, 女, 1996 年出生, 博士研究生。主要研究方向为超声辅助钻削、微细钻削刀具设计与制造。
E-mail: 15546108005@163.com