

# 低速 WEDM 制备的微织构螺旋微铣刀的铣削实验研究

巩亚东, 金丽雅, 孙 瑶, 苏志朋  
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 基于五轴低速走丝电火花线切割机床与回转机构相结合的加工方法,制备了后刀面具有微织构的螺旋微铣刀.建立了微织构螺旋微铣刀微刃单元的切削力理论模型,并开展微织构微铣刀与常规微铣刀的对比实验研究.结果表明:微织构螺旋微铣刀的切削力相对于常规刀具降低了 30%~40%,相同加工条件下,微织构螺旋微铣刀所加工的表面粗糙度降低至 0.745  $\mu\text{m}$ ,而常规微铣刀所加工的表面粗糙度为 1.130  $\mu\text{m}$ .  
**关 键 词:** 电火花加工;线切割;微织构;微铣刀;微铣削  
**中图分类号:** TG 544      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2020)08-1111-05

## Experimental Research on Micro-milling of Micro-textured Spiral Micro-milling Cutter Fabricated on Low-Speed WEDM

GONG Ya-dong, JIN Li-ya, SUN Yao, SU Zhi-peng  
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: GONG Ya-dong, E-mail: gongyd@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** A spiral micro-milling cutter with micro-texture on the flank is fabricated on a five-axis low-speed wire-cut electrical discharge machining (WEDM) with a rotary mechanism. A theoretical model for cutting force of micro-edge unit of spiral micro-milling cutter with micro-texture was established, and a comparative experiment of micro-textured micro-milling cutter and conventional micro-milling cutter was carried out. The results show that the cutting force of the micro-textured spiral micro-milling cutter is reduced by 30%–40% compared with that of the conventional tool. Under the same processing conditions, the surface roughness of the micro-textured spiral micro-milling cutter is reduced to 0.745  $\mu\text{m}$ , while the surface roughness processed by the conventional micro-milling cutter is 1.130  $\mu\text{m}$ .  
**Key words:** electrical discharge machining (EDM); wire cut; micro texture; micro milling cutter; micro milling

近年来,许多学者研究发现,通过在摩擦副表面设计具有一定尺寸样式的微织构可以有效提高其摩擦磨损性能,这为提高刀具耐用度等方面提供了新的研究方向<sup>[1-3]</sup>. Sugihara 等<sup>[4]</sup>通过激光加工技术在硬质合金刀具的前刀面加工出沟槽型微织构,其研究结果表明微织构可以改善刀屑粘结性能. Lei 等<sup>[5]</sup>利用钛宝石飞秒激光加工技术制备了前刀面具有微坑结构的微池刀具,发现这种微池刀具的切削力和刀屑接触长度均有所减小.此外,在电火花线切割加工(wire cut electrical discharge machining, WEDM)微刀具方面, Sun 和 Gong 等<sup>[6-8]</sup>采用电火花线切割机床加工出多种复杂微刀具和局部具有微回转结构的特殊构件. Gao 等<sup>[9]</sup>通过电火花线切割加工机床制备了四边形金刚石微立铣刀. Da 等<sup>[10]</sup>发现微织构刀具寿命明显高于无织构刀具. Fatima 等<sup>[11]</sup>发现微织构的存在使得刀具的前后刀面摩擦减小. Kümmel 等<sup>[12]</sup>发现微织构刀具的切削刃稳定性增加.

目前,国内外学者对微织构刀具开展了一些研究,但大多集中在宏观切削方面,在微尺度方面很少有人研究. 本文采用五轴低速走丝电火花线切割机床与高精度防水回转机构相结合,通过采用多次切割技术及合理加工工艺参数,制备出微织构螺旋微铣刀,并建立微织构螺旋微铣刀微刃单元的微铣削力模型,同时开展新型微织构螺旋微铣刀与常规微铣刀的加工性能对比实验.

### 1 微织构螺旋微铣刀微刃单元的切削力理论模型建立

选取右旋微织构螺旋微铣刀为研究对象,建立三维切削力模型如图 1 所示. 将切削刃沿着主轴方向划分为  $n$  个微刃单元,每一个微刃单元的空间力可以分解为微径向分力  $F_r$ 、微切向分力  $F_c$ 、微轴向分力  $F_a$ ,则微刃单元的受力分析如图 2 所示.

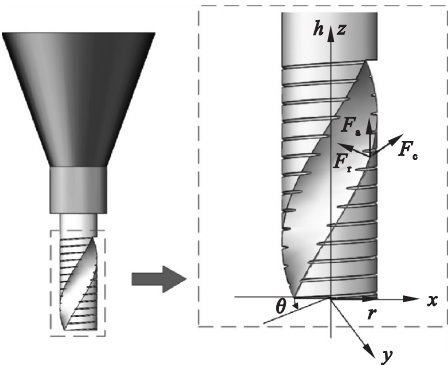


图 1 微织构微铣刀切削力示意图  
Fig. 1 Schematic of cutting forces of micro-milling cutter with micro-texture

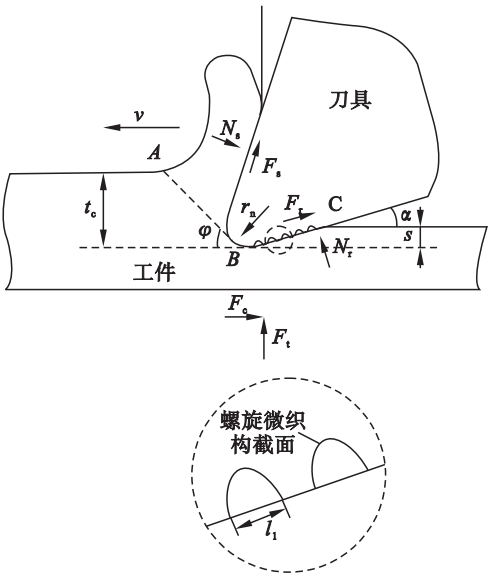


图 2 微刃单元力学模型  
Fig. 2 Mechanical model of micro-edge element

三向切削力的公式为

$$\left. \begin{aligned} dF_c &= dF_s \cdot \sin\varphi + dN_s \cdot \cos\varphi - \\ &\quad dN_r \cdot \sin\alpha + dF_r \cdot \cos\alpha, \\ dF_r &= dF_s \cdot \cos\varphi - dN_s \cdot \sin\varphi + \\ &\quad dN_r \cdot \cos\alpha + dF_r \cdot \sin\alpha, \\ dF_a &= dF_c \cdot \sin\beta. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\varphi$  为剪切角; $\alpha$  为微铣刀后角; $\beta$  为螺旋角; $dF_s, dN_s$  为前刀面剪切变形区所受摩擦力和正压力; $dF_r, dN_r$  为后刀面弹性恢复区所受摩擦力和正压力.

$$\left. \begin{aligned} dF_s &= \sigma_1 \cdot l_{AB} \cdot d_w \\ dN_s &= \tau_1 \cdot l_{AB} \cdot d_w \\ dF_r &= \tau_2 \cdot l_{BC} \cdot d_w \\ dN_r &= \sigma_2 \cdot l_{BC} \cdot d_w \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $d_w$  为微刃单元的厚度; $\sigma_1, \tau_1$  为剪切面所受正应力和剪应力; $\sigma_2, \tau_2$  为后刀面弹性恢复区在耕犁作用下所受正应力和剪应力. 后刀面耕犁区上的正应力  $\sigma_2$  为材料的屈服强度,剪应力  $\tau_2 = 1/\sqrt{3}\sigma_2^{[13]}$ , 则

$$\left. \begin{aligned} dF_c &= [\sigma_1 l_{AB} \sin\varphi + \tau_1 l_{AB} \cos\varphi - \\ &\quad l_{BC} \sigma_2 (\sin\alpha - \cos\alpha/\sqrt{3})] d_w, \\ dF_r &= [\sigma_1 l_{AB} \cos\varphi - \tau_1 l_{AB} \sin\varphi + \\ &\quad \sigma_2 l_{BC} (\cos\alpha + \sin\alpha/\sqrt{3})] d_w, \\ dF_a &= \sin\beta \cdot dF_c. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由于微织构的存在会使后刀面与已加工表面的实际接触长度  $l_{BC}$  减小, 即

$$l_{BC} = l_{BC'} - nl_1. \quad (4)$$

式中: $l_{BC'}$  为常规微铣刀后刀面与已加工表面的接触长度; $l_1$  为微织构的槽宽; $n$  为后刀面与已加工表面之间微织构的数量. 根据式(3)可知, 三向微刃切削力的大小与长度  $l_{BC}$  成正比, 由此可见, 在微铣刀刀具后刀面增加微织构可以减小切削力.

## 2 实验研究

### 2.1 微织构螺旋微铣刀和常规微铣刀的铣削力对比分析

#### 2.1.1 实验条件和实验方案

本实验采用五轴低速走丝电火花线切割机床分别加工常规微铣刀和微织构螺旋微铣刀. 实验采用阿奇夏米尔 CA20 单向走丝电火花线切割机床, 并在机床上搭建回转机构, 制备微铣刀采用的加工参数如表 1 所示, 分别制备了直径  $800\text{ }\mu\text{m}$ 、刃长  $2\text{ mm}$ 、螺旋角  $32^\circ$  的常规微铣刀, 以及具有相同刀具几何参数且后刀面存在螺距为  $175\text{ }\mu\text{m}$ 、深度为  $5\text{ }\mu\text{m}$  的微

织构螺旋微铣刀,如图 3 所示。微铣削材料为航空航天领域应用广泛的 6061 铝合金,微铣削实验在 3D

微铣床平台 JX-1 型机床上进行。采用 DH-5920N 动态信号测试分析仪实时监测铣削力。

表 1 低速走丝电火花加工微铣刀的主要加工参数  
Table 1 Main processing parameters of low-speed WEDM micro-milling cutter

工序	冲液压力 kg·cm <sup>-2</sup>	峰值电流 A	加工电压 V	脉冲宽度 μs	工件转速 r·min <sup>-1</sup>	丝张力 N	走丝速度 mm·s <sup>-1</sup>	进给速度 mm·min <sup>-1</sup>	进给量 μm
主切	10	320	170	15	60	12	30	0.5	10
修切 1	1	180	136	13	60	15	30	1.2	5
修切 2	0.3	120	100	10	60	18	30	1.4	3
精修	0.3	40	85	4	60	18	30	1.8	2
螺旋刃	1	180	136	13	1	15	30	4	150
微织构	1	180	136	13	4	15	30	0.7	5

考虑到刀具直径很小及最小切削厚度等因素,采用大主轴转速、小进给速率、小径向切深进行微铣削实验。设计单因素实验,实验参数如表 2 所示,其中轴向切深恒定为 0.4 mm。

表 2 微铣削加工参数  
Table 2 Micro-milling machining parameters

序号	$\frac{n \times 10^{-4}}{r \cdot \min^{-1}}$	$\frac{f}{\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}}$	$\frac{a_p}{\mu\text{m}}$
1	1,2,3,4,5	20	16
2	3	20,40,60,80,100	16
3	3	20	4,7,10,13,16

2.1.2 加工参数对两种微铣刀切削力的影响

主轴转速、进给速率和径向切深对两种微铣刀切削力的影响如图 4 所示。可以看出,在相同加工条件下,微织构刀具的铣削力明显低于常规刀具,约降低了 30%~40%。由图 4a 可见,在铣削实验的主轴转速范围内,两种刀具的切削力随着主轴转速的增大呈先上升后下降的趋势。在切削速度不高时,产生了积屑瘤,图 4a 中所示的 10 000~20 000 r/min 区域为积屑瘤的消退期,此时切削力上升;之后随着切削速度的增加,切削温度升高,刀屑间摩擦减小,剪切角增加,剪切角的增加使剪切力减小,同时也会使切屑惯性力增加。但由于微铣削的切削质量很小,所以随着切削速度的增加,切削力有明显的下降趋势。由图 4b 可见,铣削实验的进给速率范围内,两种刀具的切削力随着进给速率的增大呈缓慢上升趋势;随着进给速率的增加,单位时间内切削层面积增大,切削力增大。由图 4c 可见,在铣削实验的径向切深范围内,两种刀具的切削力随着切削深度的增加呈上升趋势。当切削深度较小时,刀具和工件之间发生划擦和耕犁作用,切削力较小;随着切削深度逐

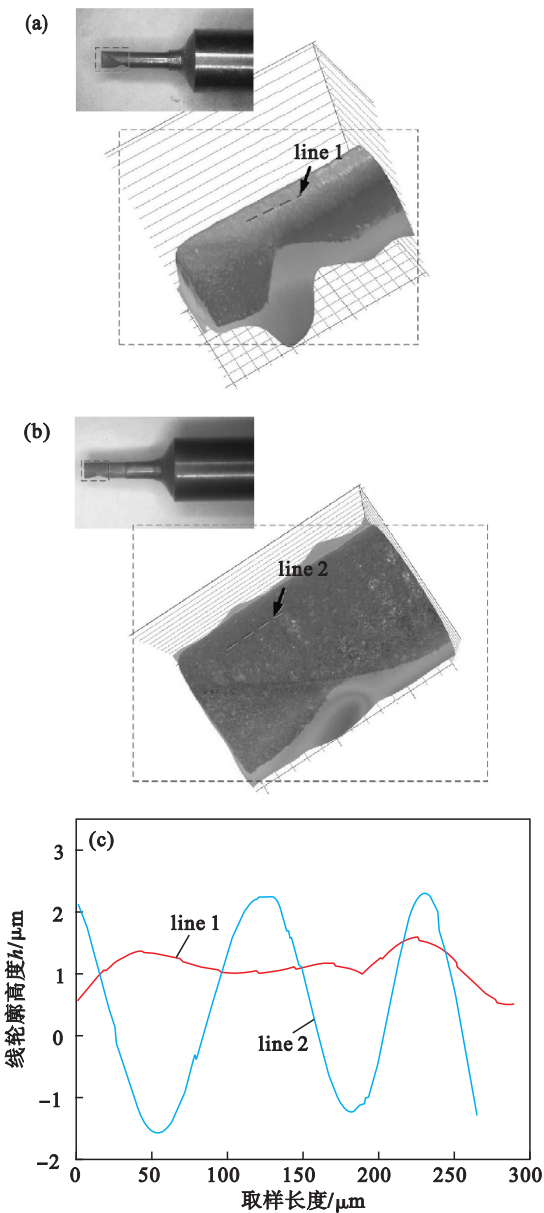


图 3 低速走丝电火花线切割加工的微铣刀  
Fig. 3 Micro-milling cutter for low-speed WEDM  
(a) 常规微铣刀; (b) 微织构微铣刀;  
(c) 一表面线轮廓高度。

渐变,刀具进入稳态切削,切削力先变大后变小;之后随着切削深度的继续增加,工件产生变形时的剪切力增大,切削力呈上升趋势.

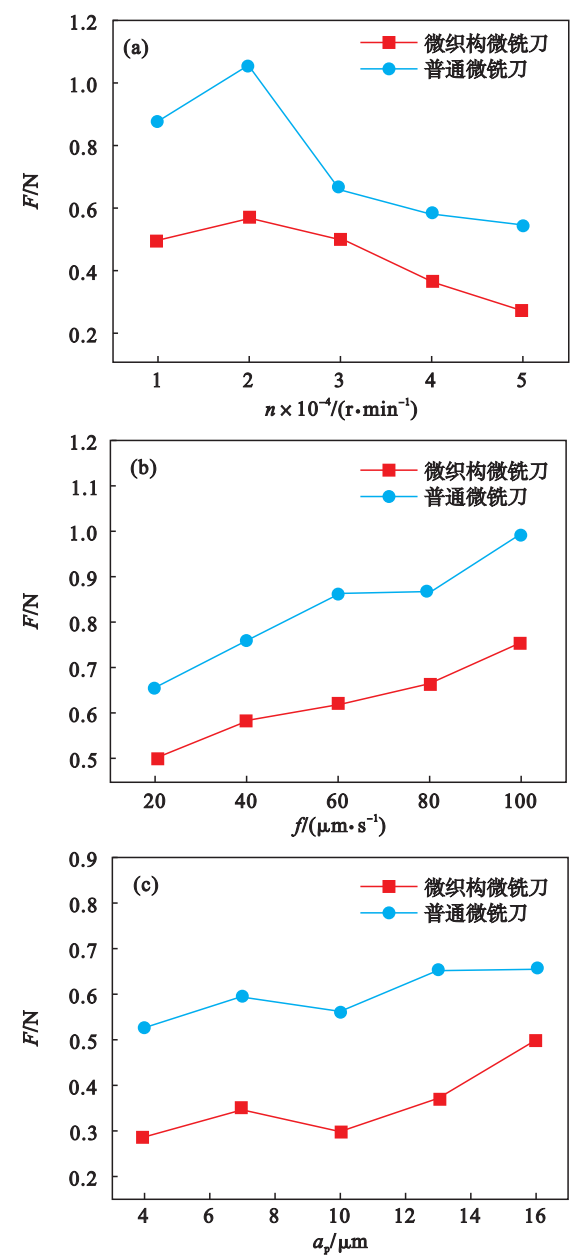


图 4 切削力和各工艺参数的关系

Fig. 4 Relationship of cutting forces and process parameters

2.2 微织构螺旋微铣刀和常规微铣刀的表面粗糙度对比分析

零件的破坏通常由表层开始,所以提高零件的表面质量尤为重要.由 2.1.2 知,当主轴转速为 50 000 r/min、进给速率为 20  $\mu m/s$ 、径向切深为 10  $\mu m$  时,两种铣刀的铣削力最小.在此工艺参数下,对两种微铣刀进行加工试验,采用 OLYMPUS LEXT OLS410 激光共聚焦显微镜进行表面观测,结果见图 5,其中 line 1, line 2 曲线为微织构微铣

刀加工表面; line 3, line 4 曲线为常规微铣刀加工表面,其表面粗糙度分别为 0.745  $\mu m$  和 1.130  $\mu m$ ,可以看出,微织构螺旋微铣刀的加工表面质量明显好于常规微铣刀加工的表面.

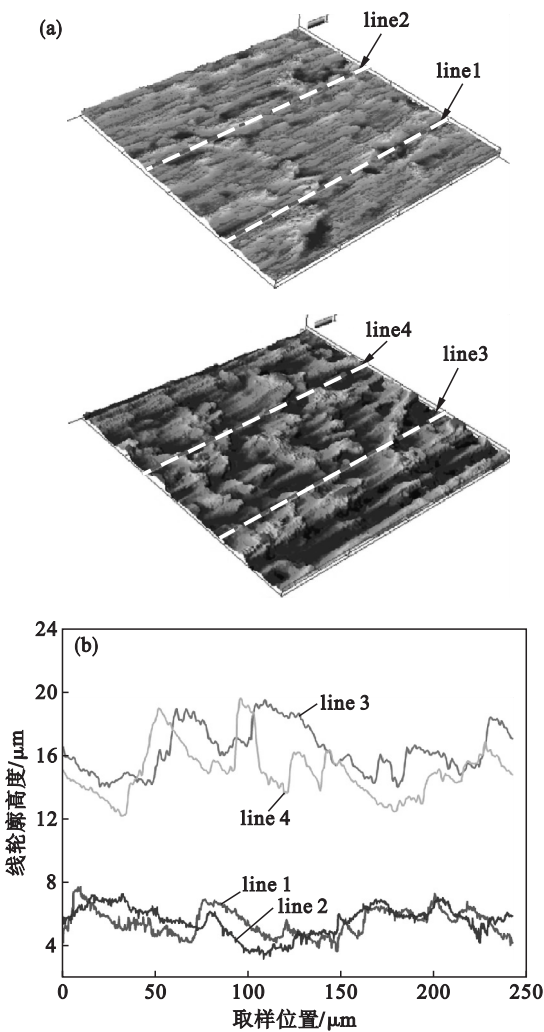


图 5 微织构螺旋微铣刀与常规微铣刀的表面形貌对比  
Fig. 5 Comparison of surface morphology of spiral micro-milling cutter with micro-texture and conventional micro-milling cutter

(a)—表面形貌; (b)—线轮廓曲线.

3 结 论

- 1) 螺旋微铣刀的微织构可以减小刀具后刀面与已加工表面的接触长度,从而降低切削力.
- 2) 采用五轴低速走丝电火花线切割机床结合回转机构制备出直径 800  $\mu m$ 、长度 2 mm 的微织构螺旋微铣刀,其切削性能显著提高.
- 3) 用微织构螺旋微铣刀和常规微铣刀加工 6061 铝合金,对比实验结果表明,相对于常规刀具,微织构螺旋微铣刀的切削力显著降低 30% ~ 40%;微织构螺旋微铣刀加工的表面粗糙度为

0.745 μm,而常规微铣刀在相同加工参数下的表面粗糙度为 1.130 μm,微织构微铣刀加工的表面粗糙度明显降低.

参考文献：

[ 1 ] 邵世超. 基于仿生微织构的刀具减摩性能研究[ D]. 合肥: 合肥工业大学,2013.  
( Shao Shi-chao. Research on anti-friction of bionic micro-texture cutting tool [ D ]. Hefei: Hefei University of Technology,2013. )

[ 2 ] 吴泽,邓建新,连云崧,等. 表面织构刀具的研究现状与进展[J]. 航空制造技术,2012(10):32-37.  
( Wu Ze,Deng Jian-xin,Lian Yun-song,et al. Development and perspective of surface textured cutting tool [ J ]. *Aeronautical Manufacturing Technology*,2012 (10):32-37. )

[ 3 ] 刘欣. 表面微织构 WC-10Ni3Al 刀具切削 Ti6Al4V 的磨损特性研究[ D]. 广州:华南理工大学,2015.  
( Liu Xin. Study on the wear behavior of micro-textured WC-10Ni3Al tools in Ti6Al4V machining[ D]. Guangzhou:South China University of Technology,2015. )

[ 4 ] Sugihara T,Enomoto T. Crater and flank wear resistance of cutting tools having micro textured surfaces [ J ]. *Precision Engineering*,2013,37(4):888-896.

[ 5 ] Lei S T,Devarajan S,Chang Z H. A study of micropool lubricated cutting tool in machining of mild steel[ J ]. *Journal of Materials Processing Technology*,2008,209(3):1612-1620.

[ 6 ] Sun Y, Gong Y D, Wen X L, et al. Micro milling characteristics of LS-WEDM fabricated helical and corrugated micro end mill [ J ]. *International Journal of Mechanical Science*,2020,167:185-207.

[ 7 ] Sun Y,Gong Y D. Experimental study on the microelectrodes fabrication using low speed wire electrical discharge turning (LS-WEDT) combined with multiple cutting strategy [ J ]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 250: 121-131.

[ 8 ] Gong Y D, Sun Y, Wen X L, et al. Experimental study on surface integrity of Ti-6Al-4V machined by LS-WEDM[ J ]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,2017,88(1/2/3/4):197-207.

[ 9 ] Gao C,Zhan Z,Wang S,et al. Research on WEDM process optimization for PCD micro milling tool[ J ]. *Procedia CIRP*, 2013,6:209-214.

[ 10 ] Da W M,Suarez M P,Machado A R,et al. Effect of laser surface modification on the micro-abrasive wear resistance of coated cemented carbide tools[ J ]. *Wear*,2013,302(1/2):1230-1240.

[ 11 ] Fatima A,Mativenga P T. A comparative study on cutting performance of rake-flank face structured cutting tool in orthogonal cutting of AISI/SAE 4140 [ J ]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,2015,78(9/10/11/12):2097-2106.

[ 12 ] K ümmel J, Braun D, Gibmeier J, et al. Study on micro texturing of uncoated cemented carbide cutting tools for wear improvement and built-up edge stabilization[ J ]. *Journal of Materials Processing Technology*,2015,215(215):62-70.

[ 13 ] Liu X Y,Devor R E,Kapoor S G,et al. The mechanics of machining at the microscale:assessment of the current state of the science [ J ]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*,2004,126(4):666-678.