

文章编号 1004-924X(2013)07-1748-07

## 薄镍板上 Meso 尺度结构的电火花线切割

宋满仓<sup>1,2\*</sup>, 解廷利<sup>1,2</sup>, 杜立群<sup>3</sup>, 王敏杰<sup>1,2</sup>, 刘冲<sup>3</sup>

(1. 大连理工大学 模塑制品教育部工程研究中心, 辽宁 大连 116023;

2. 三菱电机 大连理工大学 电加工技术中心, 辽宁 大连 116023;

3. 大连理工大学 微纳米技术及系统辽宁省重点实验室, 辽宁 大连 116023)

**摘要:**研究了利用常规电火花线切割技术加工薄镍板微结构的方法。利用慢走丝电火花线切割加工机床对厚度为 0.6 mm 镍板上的 Meso 尺度结构进行了加工试验。以机床现有的工艺条件对零件进行试切割, 对试切割后的尺寸精度和表面质量进行测量分析, 在此基础上通过对放电能量、冲液压力、切割速度等机床参数的调整改进加工工艺。探讨了在 200  $\mu\text{m}$  缝宽范围内进行多次切割的方法, 并对切割次数进行合理优化、合并。试验结果表明: 慢走丝线切割加工对小于机床设定厚度的薄板 Meso 尺度结构仍可进行稳定加工; 通过多次切割的方法可提高表面质量。在 200  $\mu\text{m}$  窄缝范围内进行 5 次常规切割, 加工后的表面粗糙度值  $R_a$  为 0.54  $\mu\text{m}$ ; 在保证表面质量的前提下, 将 5 次切割合并为 3 次切割, 加工后的表面粗糙度值  $R_a$  为 0.62  $\mu\text{m}$ , 加工时间缩短了 30% 左右。该技术可为电火花线切割加工其他材料薄板微小零件提供支持与参考。

**关键词:**电火花线切割加工; 微细加工; 薄镍板; Meso 尺度; 多次切割

**中图分类号:** TG661 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132107.1748

## WEDM of meso-scale structure on thin nickel plate

SONG Man-cang<sup>1,2\*</sup>, XIE Ting-li<sup>1,2</sup>, DU Li-qun<sup>3</sup>, WANG Min-jie<sup>1,2</sup>, LIU Chong<sup>3</sup>

(1. *Engineering Research Center for Molding Product of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;*

2. *MITSUBISHI-DUT Electrical Discharge Machining Technology Center, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;*

3. *Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: mcsong@dlut.edu.cn*

**Abstract:** A micro-fabrication method for thin nickel plates was explored by Wire-cut Electrical Discharge Machining (WEDM). A series of experiments of WEDM for the meso-scale structure of a thin nickel plate with a thickness of 0.6 mm were carried out. Then, a trial cutting test was performed using existing machining parameters in the machine, and the dimensional accuracy and surface quality of the thin nickel plate after cutting were measured and analyzed. On that basis, the machining

收稿日期: 2013-04-12; 修订日期: 2013-05-29.

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目 (No. 201202036); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2012AA040406)

process was improved by changing the discharge energy, flushing pressure and the cutting speed. The method of multiple cutting within a 200  $\mu\text{m}$  narrow slit was discussed as well, and reasonable optimization and merger for cutting times were carried out. Experimental results indicate that the WEDM can cut the meso-scale structure with a thickness less than that of machine original setting in steady for the thin nickel plate. The surface quality can be improved after multiple cutting for the 200  $\mu\text{m}$  narrow slit, and the final surface roughness  $R_a$  is 0.54  $\mu\text{m}$  after fifth cutting. With the machining surface quality guaranteed, the final surface roughness  $R_a$  is 0.62  $\mu\text{m}$  when the cutting times are merged from 5 into 3, by which the machining time is shortened by 30%. The method proposed can also apply to meso-scale structures of other materials.

**Key words:** Wire-cut Electrical Discharge Machining (WEDM); micro-fabrication; thin nickel plate; meso-scale; multiple cutting

## 1 引言

机械的微型化是现代制造技术发展的重要方向。从尺寸角度,微机械可分为 1~10 mm 的微小机械,1  $\mu\text{m}$ ~1 mm 的微机械,1 nm~1  $\mu\text{m}$  的纳米机械。为便于描述广泛应用而尺寸介于宏观和微观之间(即特征尺寸为 100  $\mu\text{m}$ ~10 mm 之间)的一类器件,将其称为 Meso 尺度结构或器件<sup>[1]</sup>。目前 Meso 尺度金属器件的主要加工技术有:超精密机械加工技术、LIGA、UV-LIGA 技术、微细电火花加工技术、微冲压成形技术和高能束加工技术等<sup>[2]</sup>。超精密机械加工机床价格较高,主要适用于复杂三维结构的加工,但可达深宽比较小;离子束和电子束加工需要在真空环境中进行,实际应用有局限;激光加工的形状精度和表面粗糙度难以满足较高的精度要求;微细冲压随着器件结构尺寸的减小,受尺寸效应影响明显,且需要加工精密模具,不适于单件小批量生产。

LIGA、UV-LIGA 技术以其良好的工艺可控性、易实现批量生产、加工精度高,可选尺寸范围广等特点在微纳加工领域得到快速发展,对于 Meso 尺度以下的零件,UV-LIGA 技术有着显著的优势。镍因其自身优良的物理化学性质,耐稀酸稀碱,优异的机械加工性能和力学性能以及对环境的良好稳定性,已成为 UV-LIGA 技术微电铸的首选材料。微细电火花线切割加工以其非接触性、高性价比的特点,在微小二维轮廓的加工中发挥着重要的作用,尤其在加工特殊材料或复杂形状金属的 Meso 尺度结构方面<sup>[2-3]</sup>应用更广。而对于 Meso 尺度的零件,UV-LIGA 加工成本相

对较高。因此,国内外学者特别关注将 UV-LIGA 与放电加工技术有机地结合加工 Meso 尺度零件的问题。Cao. D. M<sup>[4]</sup>、杜立群<sup>[5]</sup>等在微小零件加工过程中采用了 UV-LIGA 技术与微细电火花加工相结合的方法;Kodalagara. P. S<sup>[6]</sup>、Di Shichun<sup>[7]</sup>等对微细电火花线切割加工切缝宽度的影响因素进行了实验说明;O. Dodun<sup>[8]</sup>等通过实验对薄板小角度的电火花线切割加工进行了研究;Zhang. Z. H.<sup>[9]</sup>等对微细电火花线切割加工零件的表面形貌进行了建模分析;梁建钊<sup>[10]</sup>、齐文春<sup>[11]</sup>、宋满仓<sup>[12]</sup>等对薄工件的线切割加工方法、多次切割等方面进行了相应的研究。

利用电火花线切割加工钢、铜和硬质合金等材料已相当成熟,但对于其他材料或是薄板材料的线切割的研究相对较少。现有机床系统中并没有针对镍材料的加工参数,对镍板的加工需要在其他材料加工参数的基础上进行修正;当薄板厚度低于机床设定的最小加工厚度时,加工过程受冲液压力、集中放电、电极丝抖动等现象的影响更加明显,会降低加工质量;对于线切割加工,提高加工表面质量的有效方法是多次切割,但在微细结构加工中受加工区域限制,需合理设置加工偏移量。基于以上分析,本文依照某种装置研制的实际需求,对厚度为 0.6 mm 的 N4 镍板进行 Meso 尺度结构的线切割加工,通过调整加工参数及采取相应的工艺措施,实现对 Meso 尺度结构的稳定加工,探索对窄缝进行多次切割的方法以及对切割次数的合理合并与优化,以提高加工质量,降低加工成本。同时为电火花线切割加工其他材料薄板微小零件提供支持与参考。

## 2 试验设备、材料及方法

试验所用机床为三菱电机 NA2400 精密慢走丝线切割加工机床,在指定加工条件下,可保证士  $2\ \mu\text{m}$  的尺寸精度、最佳表面粗糙度  $R_a$  可达  $0.03\ \mu\text{m}$ 、角部精度可控制在  $1\ \mu\text{m}$  以内,电极丝采用直径为  $0.1\ \text{mm}$  的黄铜丝,电介质为电阻率为  $1 \times 10^5\ \Omega \cdot \text{cm}$  的去离子水。测量设备为 New View5022 型 3D 表面轮廓仪、VHX-600E 超景深三维显微镜以及数字式影像工具显微镜。

试验所用材料为高纯度 N4(Ni201)硬态镍板,厚为  $0.6\ \text{mm}$ ,其中 Ni+Co 的含量大于等于 99%。

电火花线切割加工的顺利进行首先要保证加工过程的稳定,即不出现或极少出现断丝现象。本试验以机床加工  $3\ \text{mm}$  厚钢板的参数为基础,通过调整放电能量、冲液压力、切割速度等方法使加工能够稳定进行。在对 Meso 尺度结构进行初步单次切割后,观测加工后产生的一些加工缺陷、尺寸精度以及表面质量,通过改变加工工艺方法、合理设置电极丝偏移量的大小从而消除或减小缺陷、降低加工误差,提高表面质量。试验所加工的微细结构中最小的窄缝宽度为  $200\ \mu\text{m}$ ,且对窄缝两侧表面有相同的加工要求,为提高加工质量,对在宽  $200\ \mu\text{m}$  的窄缝内实施多次切割进行分析研究。

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 小厚度工件的加工

线切割加工薄壁工件时,由于加工截面积较小,会造成放电集中,很容易使加工表面烧伤,且易断丝,难以获得高质量的加工表面;因此,一般线切割机床对加工厚度都有限定,NA2400 线切割加工机床有效加工厚度最小为  $3\ \text{mm}$ 。当所加工工件厚度小于  $3\ \text{mm}$  时,机床并没有与之相对应的加工参数,解决的方法一种是将工件材料叠加在一起,使总厚度高于机床的限定厚度,但加工后的尺寸一致性难以保证;另一种是尝试调整工艺参数。本试验以机床切割  $3\ \text{mm}$  厚钢板的工艺参数为基础,对相关参数进行调整,以降低放电加工能量、稳定加工为目标,主要是提高伺服电压(VG)、降低峰值电流(IP,SA)与冲液压力(LQ)、

增加脉冲间隔(SB)以及减小切割速度(FA),当参数取表 1 所示的档位相对应的数值时,对  $0.6\ \text{mm}$  镍板可达到稳定切割的效果。

表 1 稳定切割时的参数值

Tab.1 Parameters for stable machining

参数	VG/V	IP	SA	SB	LQ	FA/ ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )
机床原值	75	5	2	14	12	3.5
调整后值	85	4	1	16	6	1.5

注:未标注单位的参数值为机床相应档位,并非实际值。

### 3.2 偏移量修正

为保证加工后的尺寸精度,电极丝的偏移量(即电极丝中心到所要加工表面的距离)应为单侧放电间隙和电极丝半径值之和。由于本试验中被加工工件厚度仅为  $0.6\ \text{mm}$ ,小于机床设定的最小加工厚度  $3\ \text{mm}$ ,且其材质为镍而非机床指定的钢,导致在放电加工过程中单侧放电间隙  $d$ (如图 1 所示)与机床默认值会产生偏差。

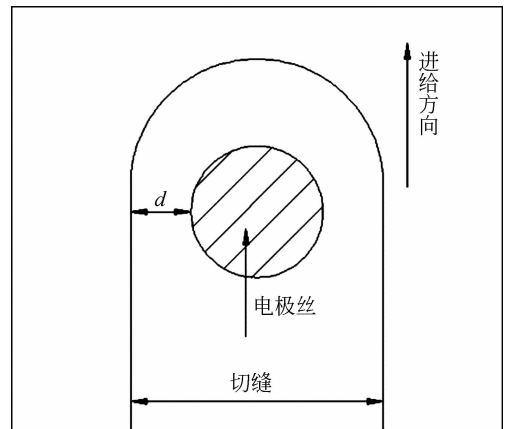


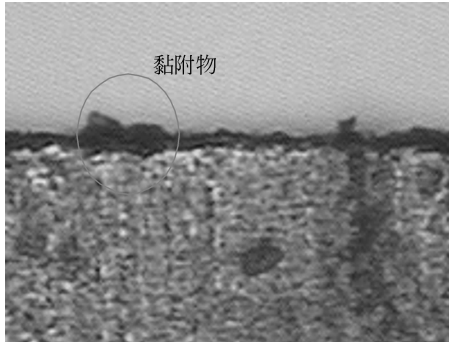
图 1 放电间隙示意图

Fig.1 Schematic diagram of discharge gap

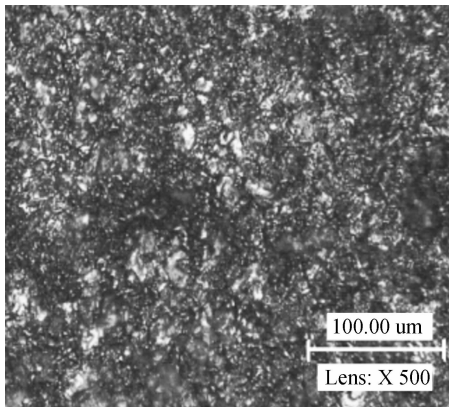
在机床设定的偏移量为  $0.056\ \text{mm}$  时,通过工具显微镜和三维表面轮廓仪测量一次切割后的窄缝宽度,取 10 个位置对切缝进行测量,切缝的平均宽度值为  $0.138\ \text{mm}$ ,与理论值  $2 \times 0.056 = 0.112\ \text{mm}$  有差异。因电极丝为双侧放电,电极丝直径为  $0.1\ \text{mm}$ ,所以一次切割时实际单侧放电间隙为  $19\ \mu\text{m}$ ,故将机床原有的偏移量  $0.056\ \text{mm}$  修正为  $0.069\ \text{mm}$  后,才可保证一次切割后的尺寸精度。

### 3.3 首次切割表面质量

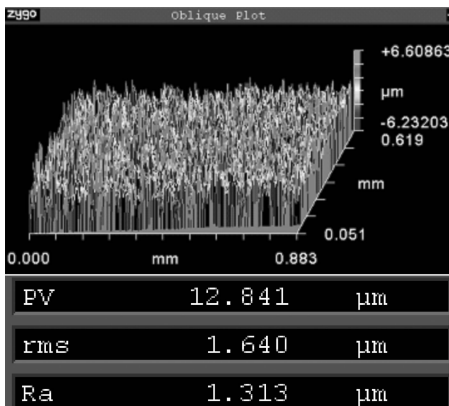
使用三维轮廓仪及超景深显微镜进行检测,经过首次切割后的工件表面质量如图 2 所示。



(a)黏附现象  
(a)Adhesion phenomenon



(b)显微照片  
(b)Surface photomicrograph



(c)表面粗糙度测量  
(c)Surface roughness measurement

图 2 表面质量情况

Fig. 2 Surface quality after the first cutting

首次切割后工件表面质量较差,其表面粗糙度值较大,且在工件表面有大量黏附物,难以去除。主要原因是首次切割为粗加工,放电能量较

大,表面烧蚀严重,导致表面质量较差;而受工件厚度限制,且整体尺寸较小,冲液压力不能太大,对废屑毛刺等起不到有效的清除作用,产生如图 2(a)所示的黏附现象。而从图 2(b)、(c)可以看到,其表面烧蚀严重,均匀性很差,表面粗糙度值为  $1.31 \mu\text{m}$ 。

### 3.4 多次切割

在电火花线切割加工中,多次切割是提高加工表面质量的有效方法,通过不断地降低放电能量,逐渐地减小放电间隙,使加工去除量随之变小,而使表面具有较低的粗糙度值,获得较高的表面质量。本试验一方面受材料厚度和材质的影响:其实际偏移量和机床给定值不统一,需要逐一进行修正;另一方面受被加工微结构尺寸限制:其窄缝宽度最小为  $200 \mu\text{m}$ ,且缝的两侧对表面有同样的质量要求,所以对偏移量的选取至关重要,较小的偏移量值不能达到多次切割的目的,而较大的偏移量在对一侧切割的同时会对另一侧的表面产生不良影响。

在首次切割的基础上进行第二次切割,测量第一、二次切割表面的高度差  $h$ ,由公式(1)、(2)可知第二次切割时的单侧放电间隙  $d_2$ ,相应的两次切割如图 3 所示。以此类推,分别进行第三、第四、第五次切割后可知其相应的单侧放电间隙值  $d_3$ 、 $d_4$ 、 $d_5$ 。5 次切割的单侧放电间隙依次为  $19$ 、 $15$ 、 $10$ 、 $6$  和  $4 \mu\text{m}$ 。为保证尺寸精度,第五次的偏移量应为电极丝半径值与单侧放电间隙之和,即  $H_5 = 54 \mu\text{m}$ ,考虑到各次切割的放电间隙、加工余量及加工空间的限制,前 4 次切割的偏移量依次取  $118$ 、 $88$ 、 $68$  和  $59 \mu\text{m}$ 。

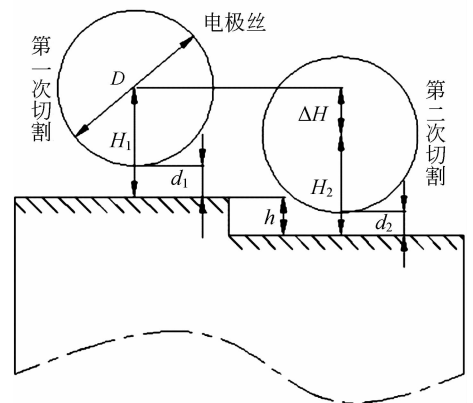


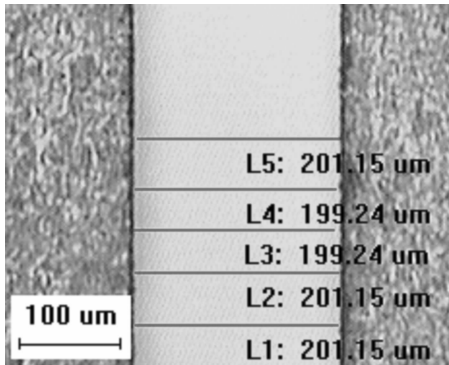
图 3 多次切割示意图

Fig. 3 Schematic diagram of multiple cutting

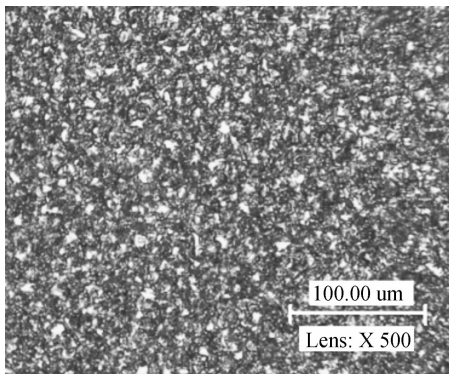
$$H_2 = H_1 + h - \Delta H, \quad (1)$$

$$d_2 = H_2 - D/2, \quad (2)$$

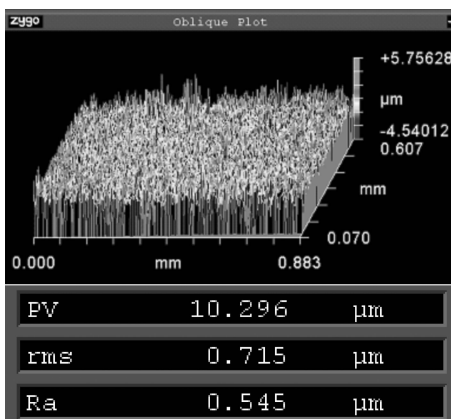
其中:  $H_1$  为第一次切割时电极丝偏移量( $\mu\text{m}$ );  $H_2$  为第二次切割时电极丝偏移量( $\mu\text{m}$ );  $h$  为两次切割后表面高度差( $\mu\text{m}$ );  $\Delta H$  为偏移增量( $\mu\text{m}$ );  $D$  为电极丝直径( $\mu\text{m}$ );  $d_2$  为第二次切割单侧放电间隙( $\mu\text{m}$ )。



(a) 200  $\mu\text{m}$  窄缝尺寸  
(a) Dimensions of 200  $\mu\text{m}$  slit



(b) 表面显微照片  
(b) Surface photomicrograph



(c) 粗糙度测量  
(c) Surface roughness measurement

图 4 5 次切割效果

Fig. 4 Results of after machining for five times

用上述调整后的工艺条件及计算所得的偏移量在厚度为 0.6 mm 的镍板上对宽度为 200  $\mu\text{m}$  的窄缝进行 5 次切割, 测量其窄缝宽度后, 求取平均值为 200.39  $\mu\text{m}$ , 而两侧表面粗糙度值  $R_a$  可达 0.54  $\mu\text{m}$ , 其表面形貌及测量结果如图 4 所示。

#### 4 切割次数的合并

为比较分析, 在同一块镍板上进行分段线切割试验, 即第一段仅为首次切割, 第二段为在首次切割基础上进行 2 次切割, 以此类推, 对切割后的表面进行测量。由图 5 和 6 可知, 在 5 次切割过程中前 3 次切割后表面质量并没有得到明显的改善, 其表面粗糙度值  $R_a$  依次为 1.31、1.44、1.43  $\mu\text{m}$ , 直到第四次切割后, 表面质量有了较显著地提高, 表面粗糙度值  $R_a$  降低为 0.64  $\mu\text{m}$ , 所以在前 3 次切割中加工能量相对于薄镍板而言, 均处于一个较大的水平, 只适合于进行粗加工, 而对于表面的精加工或半精加工并不适合, 因此可以考虑在 5 次切割的基础上将前 3 次切割合并简化为 1 次粗加工, 即用大能量去除绝大部分的加工量, 用之前 5 次切割时第四次和第五次的加工条件作为半精加工和精加工对表面进行完善。

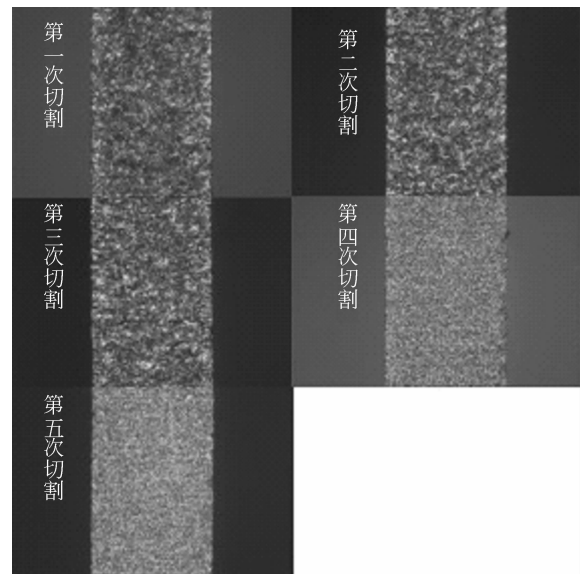


图 5 线切割加工表面

Fig. 5 Images of WEDM machined surface

首先在第一次切割参数的基础上, 降低放电能量, 使粗加工顺利进行并有效地去除大部分的加工余量; 之后省略第二、三次切割, 直接用第四

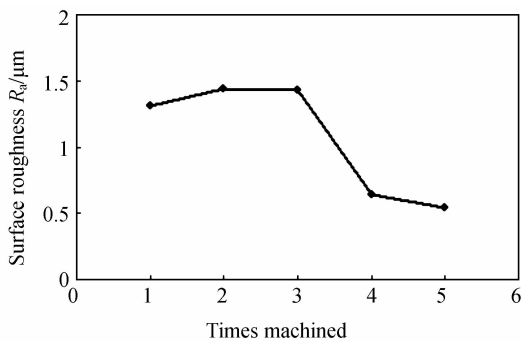
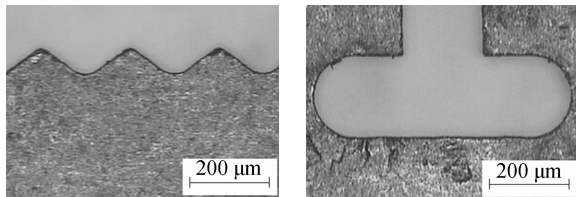


图6 表面粗糙度与切割次数的关系

Fig. 6 Relationship between surface roughness and cutting times

次切割参数进行切割,由于首次切割后表面粗糙,所以此时要提高冲液压力,适时调整伺服电压,对表面进行半精加工;再用第五次切割参数进行精加工。合并简化后的加工表面质量与5次切割的结果较为接近,表面粗糙度值  $R_a$  可达  $0.62\ \mu\text{m}$ 。图7是切割次数合并后3次切割的微齿形结构和  $200\ \mu\text{m}$  窄缝。3次切割后微结构表面粗糙度值  $R_a$  分别为  $1.94$ 、 $0.73$  和  $0.62\ \mu\text{m}$ ,同时加工时间缩短了30%左右,在满足表面质量要求的前

图7 微齿结构和  $200\ \mu\text{m}$  宽窄缝Fig. 7 Micro tooth profile and  $200\ \mu\text{m}$  slit

提下,提高了加工效率,降低了加工成本。同时由于切割次数的减少,加工过程中的总偏移量相应减小,在保证尺寸精度和表面质量的前提下,其可加工的最小缝宽由5次切割时的  $200\ \mu\text{m}$  降低到  $160\ \mu\text{m}$ 。

## 5 结 论

通过对放电能量、冲液压力、切割速度等机床参数的调整,慢走丝电火花线切割对厚度为  $0.6\ \text{mm}$  薄镍板上的 Meso 尺度结构可以进行稳定切割,但是由于工件厚度较小,切割后会产生表面粗糙、废屑黏附等加工缺陷,经过对加工工艺的改进,缺陷可得到消除或一定程度的减小。

多次切割是电火花线切割加工中提高加工质量的有效方法,通过用每次切割后缝宽的测量和计算结果,对电极丝偏移量进行修正,在宽度为  $200\ \mu\text{m}$  的窄缝内进行偏移量依次为  $118$ 、 $88$ 、 $68$ 、 $59$  和  $54\ \mu\text{m}$  的5次切割,其最终窄缝宽度可达  $200.39\ \mu\text{m}$ ,表面粗糙度值由一次切割后的  $R_a\ 1.31\ \mu\text{m}$  降低为5次切割后的  $R_a\ 0.54\ \mu\text{m}$ 。

在5次切割的基础上对切割次数进行合并简化,由5次切割合并为3次切割,其最终加工表面粗糙度值  $R_a$  为  $0.62\ \mu\text{m}$ ,与5次切割效果相近,但加工时间缩短了30%左右,同时由于切割次数的减小,可加工的最小缝宽降低为  $160\ \mu\text{m}$ ,扩大了线切割微细加工的范围。

## 参考文献:

- [1] 王振龙. 微细加工技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.  
WANG ZH L. *Micro Manufacturing Technology* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [2] 明平美. UV-LIAG-微细电火花加工组合制造技术基础研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2006.  
MING P M. *Fundamental reaching on UV-LIGA-Micro-EDM technology* [D]. Nanjing: Nanjing university of aeronautics and astronautics, 2006. (in Chinese)

- [3] 荣烈润. 基于微细特种加工的微细制造技术[J]. 金属加工, 2011, 13: 33-37.  
RONG L R. Micro fabrication technology based on non-traditional machining [J]. *MW Metal Cutting*, 2011, 13: 33-37. (in Chinese)
- [4] CAO D M, JIANG J, YANG R, et al.. Fabrication of high-aspect-ratio micro-scale mold inserts by parallel  $\mu$ -EDM [J]. *Microsyst Technol*, 2006, 12 (9): 839-845.
- [5] 杜立群, 莫顺培, 张余升, 等. UV-LIAG-微细电火花加工技术组合制造三维金属微结构的研究[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 363-368.  
DU L Q, MO SH P, ZHANG Y SH, et al.. Fabrication of 3D metal microstructure based on UV-

- LIGA and micro-EDM technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2):363-368. (in Chinese)
- [6] KODALAGARA P S. Material removal characteristics of micro-slot(kerf) geometry in  $\mu$ -WEDM on aluminum [J]. *Int Adv Manuf Technol*, 2010, 51: 611-626.
- [7] DI S C, CHU X Y, WEI D B, *et al.*. Analysis of kerf width in micro-WEDM [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2009, 49:788-792.
- [8] DODUN O, GONCALVES A M. Using wire electrical discharge machining for improve corner cutting accuracy of thin parts [J]. *Int Adv Manuf Technol*, 2009, 41:858-864.
- [9] ZHANG Z H, GUO L B, CUI H, *et al.*. Surface texture evaluation of micro-wEDM [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 138-139: 1251-1257.
- [10] 梁健钊, 梁秋华. 用线切割对薄工件进行多片加工 [J]. *机械工程师*, 2012(7):122-123.
- LIANG J ZH, LIANG Q H. Multi-chip cutting for the thin workpiece using WEDM [J]. *Mechanical Engineer*, 2012(7):122-123. (in Chinese)
- [11] 齐文春, 麻长平, 高坚强. 基于多次切割工艺的第一次切割参数优化策略研究 [J]. *电加工与模具*, 2012(3):50-53.
- QI W CH, MA CH P, GAO J Q. Research for the strategy of first cutting parameter optimization based on multiple cutting process [J]. *Electromachining & Mould*, 2012, (3):50-53. (in Chinese)
- [12] 宋满仓, 张建磊, 于超, 等. 聚晶金刚石复合片的电火花线切割精密加工试验 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6):1303-1309.
- SONG M C, ZHANG J L, YU CH, *et al.*. Experiment of WEDM precision machining for polycrystalline diamond compact [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6):1303-1309. (in Chinese)

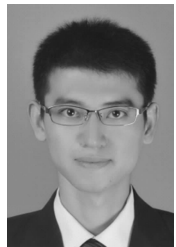
#### 作者简介:



宋满仓(1964—),男,辽宁本溪人,博士,副教授,1989年于清华大学获得硕士学位,2005年于大连理工大学获得博士学位,主要从事模具设计与制造技术及放电加工工艺的研究。E-mail: mcsong@dlut.edu.cn



王敏杰(1958—),男,山西太原人,博士,教授,博士生导师,1989年于大连理工大学获得博士学位,主要从事模具技术、高速切削与先进制造技术、高分子材料成型技术和水中航行体流体动力学的研究。E-mail: mjwang@dlut.edu.cn



解廷利(1985—),男,山西朔州人,硕士研究生,2010年于大连交通大学获得学士学位,主要从事电加工技术的研究。E-mail: xie\_tingli@163.com



刘冲(1963—),男,湖北武汉人,博士,教授,博士生导师,1993年于华中科技大学获得博士学位,主要从事微机电系统(MEMS)、生化微传感器、物联网技术和精密仪器与测试技术方面的研究。E-mail: chongl@dlut.edu.cn



杜立群(1966—),女,黑龙江望奎人,博士,教授,博士生导师,1999年于东北大学获得博士学位。主要从事微机电系统、微器件 UV-LIGA 加工技术、微模具制造及超声波应用方面的研究。E-mail: duliqun@dlut.edu.cn