

基于多线电极的电解线切割试验研究

马再权,李湘生,陈力,杨宇,张帅

(浙江理工大学机械与自动控制学院,杭州 310018)

摘要:为提高电解线切割的加工稳定性和加工效率,设计了一种电解线切割的多线切割装置。该装置可以装夹多根线电极,实现多线电极电解加工;采用了一种新的多线电极张紧装置,可以减小加工过程中线电极的抖动。利用多线电极电解线切割加工系统,进行了多线切割加工试验,探究主要工艺参数对加工质量的影响规律,试验结果表明:多线电极张紧装置有效地降低了加工过程中线电极的抖动,使加工稳定性大幅提高,避免了加工过程中出现短路现象;采用多线电极同时切割加工可以提高加工效率,同时采用复合电解液也可以提高加工效率。

关键词: 多线电极;电解线切割;线电极抖动;张紧装置;加工效率

中图分类号: TG662

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2017)04-0538-07

0 引言

电解加工通过电解方式去除工件的多余材料,在电解线切割加工过程中,电解线电极或者工件按照数控轨迹实现进给运动,完成零件二维轮廓的加工。电解线切割加工没有切削力和切削热,因此在被加工的工件表面不会出现残余应力和变形,没有热影响区,有利于提高加工的精度。在电解线切割加工中,工具电极为细丝状电极,相比于成形电解的工具电极,电极设计和制造成本较低。电解线切割具有较强的工艺适应能力,对试制新产品意义重大;同时,对大批量生产在快速性和柔性上也得到明显改善^{[1]67-68},其发展应用前景十分可观。

目前,国内外对电解线切割的研究已获得一定成果。朱兵等^[2]为解决加工高深宽比结构时的排屑问题,设计了轴向冲液装置,在5 mm厚的不锈钢板上加工出了缝宽为160 μm 、深宽比为30的微型花键结构。朱晓龙等^[3]将脉冲电源应用到电解线切割加工中,与采用直流电源加工相比,切缝宽度显著降低,提高了加工质量。王峰等^[4]采用在电解加工过程中阴极电极直线进给的同时,叠加与直线进给方

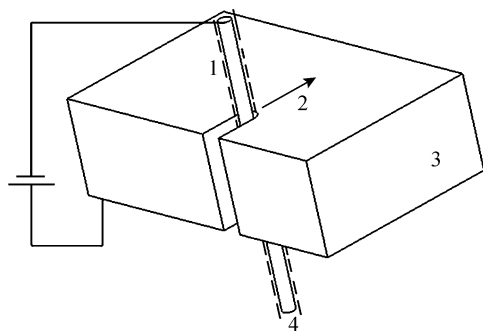
向平行的振动的复合进给方法,提高了加工的定域性,降低了杂散腐蚀的影响。Boxhammer等^[5]在利用电解线切割加工微小结构时,采用高频窄脉冲电流进行切割加工,进一步稳定地提高了加工的定域性。于洽等^[6-7]为了强化电解线切割加工时加工间隙内的传质过程,采用线电极往复运动复合工件低频振动的方法,促进加工间隙内电解产物的排出,获得了较高的加工质量。Pan等^[8]研究了阴极振动的振幅和频率对小孔电解加工精度的影响,建立了阴极振动的机械动力学模型,结果表明采用阴极振动方式使电解加工的定域性大大提高,加工精度大幅提升。目前电解加工在加工定域性和加工稳定性等方面的控制仍然较困难,使得电解加工技术的进一步发展和广泛应用受到限制^[9]。

在电解线切割加工过程中,确保阴阳极间产物及时排出,以及降低加工过程中线电极抖动,是获得理想加工质量的关键。极间间隙内的电解产物不能及时排出,导致加工间隙内电场和流场畸变,影响加工稳定性和加工精度。由于电解线切割采用细丝状电极,可根据预加工工件的形状尺寸,等距安装多根线电极,结合数控运动,可同时切割多个工件以提高

加工效率。理论上,如果工件和线电极之间实现五轴联动,可实现某些复杂曲面的加工。目前,电解线切割加工多为单根线电极切割加工,加工效率很难满足需求,本文在采用轴向冲液的同时,采用多线电极张紧的方法,一方面降低加工过程中线电极抖动,保证加工稳定性和加工质量;另一方面,在保证加工质量的同时提高加工效率。本文为电解线切割加工的高效率生产进行前期探索,通过对电解线切割加工工艺进行研究,针对影响工件加工质量的加工电压、进给速度等主要工艺参数为研究对象进行相关试验^[10],最后采用最优的工艺参数在不锈钢板上进行试验,以获得比较理想的加工质量。

1 电解线切割加工原理

电解线切割加工原理如图1所示,加工时线电极与电源负极相接,工件与电源正极相接,工件与线电极之间有一定的加工间隙,电解液通过间隙沿线电极轴向流动,工件或线电极做进给运动,工件阳极不断被电解蚀除以达到切割成形。



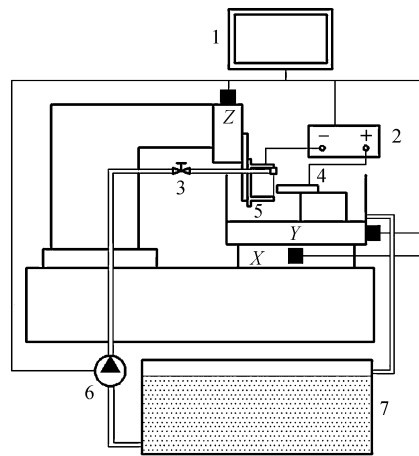
1. 电解液;2. 电极进给方向;3. 工件;4. 线电极

图1 电解线切割示意

要获得较高的加工质量必须提高工件溶解的域性,则加工时极间间隙要尽可能的小,而间隙越小,引发短路、火花的可能性越大,导致加工稳定性降低,加工精度降低。由于电解线切割在加工时线电极与工件之间的加工间隙较小,电解产物不易排出,电解产物在加工区域的堆积导致电解液得不到及时更新,极易引发短路,使加工暂停影响加工效率;为了使电解产物从极间及时排出,加工过程中常采用沿线电极轴向通以高速流动的电解液,或在空心电极中通入高压电解液的方法使电解产物及时排出^[11],然而高速流动的电解液会引起线电极抖动,降低加工稳定性,再次引发短路的可能性增加。为尽量降低加工过程中线电极抖动,有必要对线电极设计张紧装置。

2 多线电极电解线切割加工系统

试验系统由高频开关电源、多线电极张紧装置及冲液装置、电解液及其循环过滤系统、运动平台及控制系统组成,系统原理如图2所示。本系统的加工电源为高频开关电源,该电源的输出为40 kHz 方形脉冲电流。采用脉冲电流电解加工有两个优点:一方面,可以在非电解脉冲时间依靠电解液的循环流动将电解产物带离加工区,使极间间隙内的电解液得到及时更新,加工间隙内电场和流场分布均匀,保证加工稳定性;另一方面,采用脉冲电流电解加工,使得阴极反应析出的氢气泡呈脉冲状^{[1]107}的气泡,对电解液起到搅拌作用,从而加速电解产物的排出,提高加工精度。电解液及其循环过滤系统采用两级过滤,一级过滤主要用以去除电解产生的絮状沉淀 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 。二级过滤主要用来去除固体杂质颗粒。经过两级过滤后,电解液即可满足加工要求。控制系统通过脉冲控制伺服电机以驱动X、Y、Z轴运动平台,实现进给成形运动。



1. 控制系统;2. 加工电源;3. 流量开关;4. 工件;
5. 多线电极张紧装置及冲液装置;6. 泵;7. 电解液槽

图2 试验系统原理图

2.1 多线电极张紧装置

本文采用的线电极为电火花线切割用钼丝,由于刚度小,周围环境及加工过程中的冲液等因素极易造成线电极抖动,导致切割的轨迹发生偏移,使加工精度降低;另外,对于微细缝加工,因线电极偏移与工件接触造成短路的可能性增加。

本文自行设计了多线电极张紧装置,用以解决加工过程中线电极抖动现象,该装置可等间距装夹多根线电极,实现多线电极电解线切割加工,进而提高加工效率。采用的线电极为直径0.18 mm的钼丝,抗拉强度约为1500 MPa^[12];线电极可承受最大

张紧力计算如式(1)所示:

$$\sigma_b = P/s \quad (1)$$

其中: σ_b 为材料抗拉强度, N/mm^2 ; P 为材料拉断时承

受的最大拉力, N ; s 为材料原横截面积, mm^2 。由式(1)可计算出, 单根钼丝线电极所能承受的最大张紧力为 38 N。张紧装置所用压缩弹簧的参数如表 1 所示。

表 1 圆柱螺旋压缩弹簧参数

材料	弹簧丝直径/mm	弹簧中径/mm	有效工作圈数	总圈数	弹簧自由高度/mm	压并变形量/mm	弹簧刚度/ ($N \cdot mm^{-1}$)	弹簧安装高度/mm
弹簧用不锈钢丝	1.2	10.0	5	7	18.0	9.6	4	11.0

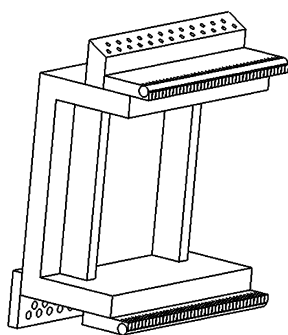
多线电极张紧装置如图 3 所示。工作原理为: 压紧体套上压缩弹簧后穿过丝张紧座上的通孔, 线电极穿过压紧体上的穿丝端分成两股穿过上下分丝座上的线槽, 与光轴接触并汇合于丝固定座上的锁紧螺钉, 按压压紧体使压缩弹簧收缩 7.0 mm 左右。用公式可以表示为:

$$c = F/\lambda \quad (2)$$

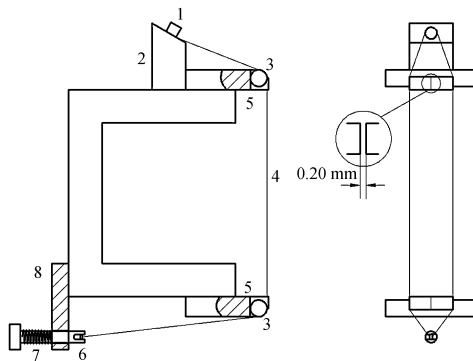
其中: c 为弹簧的刚度, N/mm ; F 为弹簧所受的载荷, N ; λ 为弹簧在受 F 载荷时的变形量, mm 。由式(2)可计算出, 此时压缩弹簧所载荷为 28 N, 即作

用在单根线电极上的张紧力为 14 N, 远小于线电极所能承受的最大张紧力; 张紧线电极并紧固锁紧螺钉, 线电极即在压缩弹簧弹力作用下处于张紧状态。同时, 张紧力的大小可根据压缩弹簧的压缩量动态调节。

线电极紧压上下光轴, 与光轴表面的接触长度约为 1/4 圆弧, 保证接触部位受力均匀断丝风险降低; 即使线电极在加工过程中出现延伸现象, 也会在压缩弹簧弹力的作用下处于持续张紧状态, 保证电解切割加工持续稳定地进行。



(a) 三维图



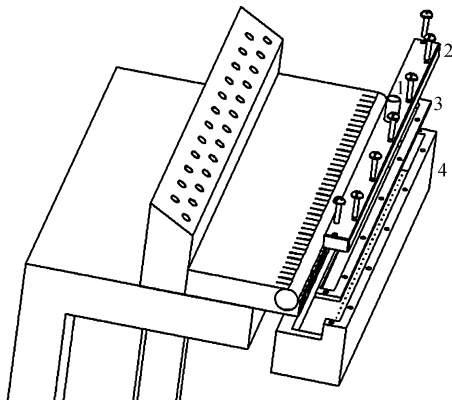
(b) 工作原理

1. 锁紧螺钉; 2. 丝固定座; 3. 上、下光轴; 4. 线电极; 5. 上、下分丝座; 6. 压紧体; 7. 压缩弹簧; 8. 丝张紧座

图 3 多线电极张紧装置三维图及工作原理

2.2 冲液装置

为配合多线电极张紧装置, 设计了专用的冲液装置, 如图 4 所示。冲液装置为矩形槽结构, 固定在多线电极张紧装置上分丝座的下端, 冲液槽的底部



1. 进液口; 2. 密封盖; 3. 密封垫; 4. 冲液槽

图 4 冲液装置

开有等间距的冲液孔, 加工时电解液从冲液槽密封盖上的进液口进入, 通过槽底部的冲液孔沿线电极圆周不断流动。

3 加工试验及结果分析

为研究加工电压、进给速度对工件切缝质量的影响, 在其他工艺参数相同的情况下, 分别以加工电压、进给速度为单一变量进行以下电解线切割加工试验, 以切缝缝宽及切缝轮廓均匀性作为加工质量好坏的评价标准, 试验中各工艺参数如表 2 所示。

表 2 加工试验工艺参数

电解液	阴极工具材料	阳极工件材料	加工温度 $T/^{\circ}C$	冲液速度 $V/(m \cdot s^{-1})$
单相电解液	钼丝	304 不锈钢	室温	0.5
复合电解液	钼丝	304 不锈钢	室温	0.5

注: 单相电解液为 $NaNO_3$ 的质量分数为 5% 的水溶液; 复合电解液为 $NaNO_3$ 与 $NaCl$ 的混合液, 其中 $NaNO_3$ 的质量分数为 8%, $NaCl$ 的质量分数为 2%; 不锈钢板厚 5 mm; 张紧装置装夹的线电极至少 4 根。

3.1 进给速度对加工的影响

3.1.1 单相电解液加工试验

试验采用加工电压为 12 V,以不同的线电极进给速度进行加工试验,得到平均缝宽 b 和缝宽标准差 σ 随加工进给速度的变化关系,如图 5 所示。

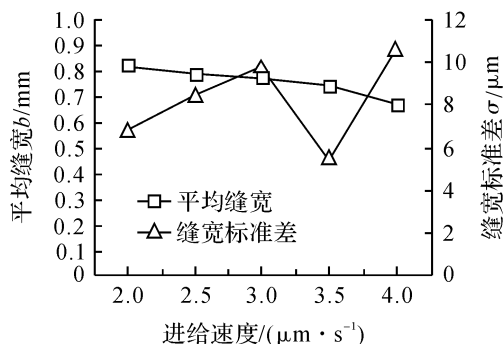


图5 进给速度与切缝宽度的关系

由图 5 可知:平均切缝宽度随进给速度增加而减小,缝宽标准差范围小,切缝均匀一致性好。这是因为进给速度变快,线电极在已加工过的区域停留的时间就会减短,二次电解的可能性减小,进而工件的切缝质量好。

进给速度与加工质量的关系并不是始终呈正相关,进给速度变大,切缝随之变窄,不利于电解产物的排出和电解液的更新,进而加工质量下降;当进给速度超过阳极工件溶解蚀除的速度时,将发生短路现象,加工过程中应极力避免发生短路而造成断丝。

由此可知,进给速度对工件的切缝质量影响极为显著,对于进给速度通常希望其在临界速度范围内越大越好。

图 6 为优化加工参数后在不锈钢板上加工获得的切缝实物,其加工电压为 12 V,进给速度为 $3.5 \mu\text{m}/\text{s}$,从图中可以看出,工件切缝轮廓均匀,加工质量较好。

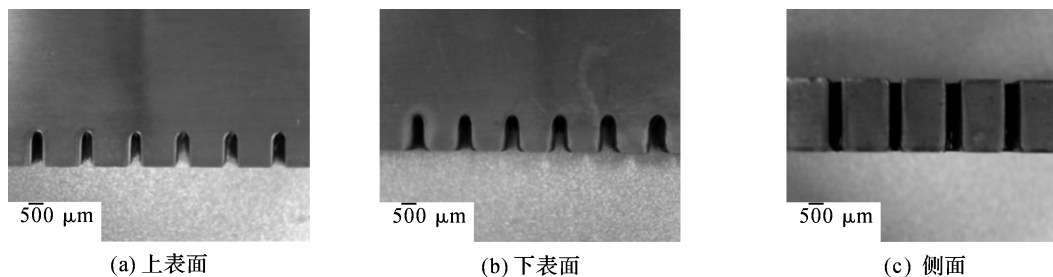


图6 单相电解液切割加工实物

3.1.2 复合电解液加工试验

经过单相电解液切割加工试验得知, NaNO_3 电解液非线性性能比较理想,成形精度高,使用过程安全可靠。但其主要缺点是电流效率低、生产效率不高;另外,加工过程中阴极有氨气析出,需要增设通风排气装置^{[1]119}。鉴于 NaNO_3 电解液成形精度高而生产效率低,本研究采用 NaNO_3 与 NaCl 的复合液,进行加工试验,检验工件的切缝质量。试验中各工艺参数均与单相电解液相同,得到利用复合电解液加工时平均缝宽 b 和缝宽标准差 σ 随加工进给速度变化的关系,如图 7 所示。

从图 7 可知,利用复合电解液加工时,平均缝宽随进给速度的变化趋势与单相电解液加工时相一致。

在进给速度为 $2.5 \mu\text{m}/\text{s}$ 时缝宽标准差最小,说明在加工电压为 12 V 时,以此进给速度进行切割加工,获得的切缝轮廓均匀,加工质量最好。

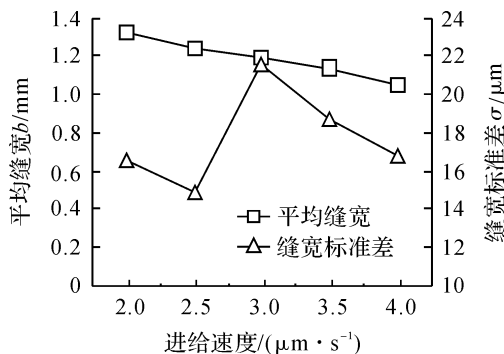


图7 进给速度与切缝宽度的关系

图 8 为在加工电压为 12 V 时的加工实物,从图中可以看出,工件的上表面切缝尺寸均匀,加工质量好,下表面出现杂散腐蚀现象,加工的定域性稍差,工件的侧面切缝出现加工斜度。与采用单相电解液切割加工相比,工件的切缝宽度增加。在复合电解液中因有 NaCl 的存在,电解加工的效率得到提升,同时,切缝受杂散腐蚀的影响增加,定域性下降,切缝的加工质量降低。

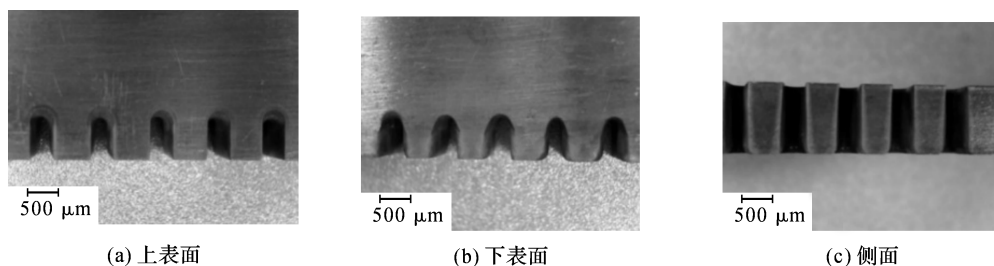


图8 复合电解液加工实物

3.2 加工电压对加工的影响

3.2.1 单相电解液加工试验

为研究加工电压对工件加工质量的影响,线电极的进给速度控制在 $3.0 \mu\text{m/s}$,以不同的加工电压进行加工试验,得到平均缝宽 b 和缝宽标准差 σ 随加工电压变化的关系,如图9所示。

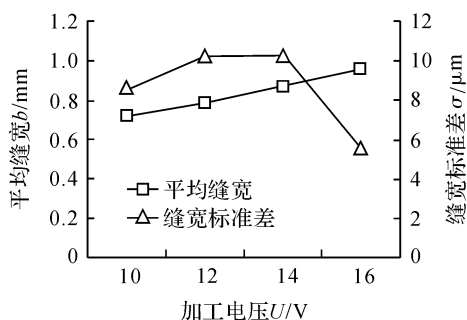


图9 加工电压与切缝宽度的关系

从图9可知,随加工电压的逐渐增大,工件的切缝宽度不断增加,这是因为随着加在两极上的电压逐渐增大,电极间的反应电流变大,工件被蚀除的区域变大,导致切缝宽度变大。

3.2.2 复合电解液加工试验

采用与单相电解液相同的工艺参数,利用复合电解液进行加工试验,得到复合电解液条件下,平均缝宽 b 和缝宽标准差 σ 随加工电压变化的关系,如图10所示。

从图10可知,随着加工电压的增大,工件的平均切缝宽度逐渐变大。切缝标准差出现两端低中间高的趋势,加工电压为10 V时缝宽标准差最小。

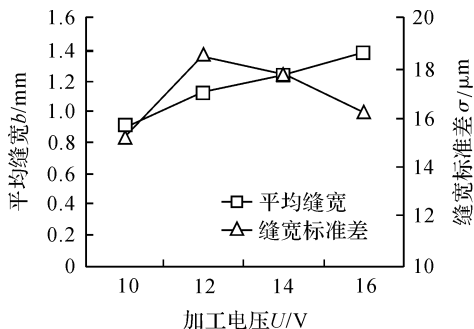


图10 加工电压与切缝宽度的关系

与单相电解液加工试验结果一致,随着加工电压的逐渐增大,工件的切缝宽度逐渐增大。因为加在两极上的加工电压逐渐增大,电极间的反应电流变大,工件被溶解蚀除区域也相应增大,导致缝宽变大。

综合试验结果可知,加工电压为影响加工质量的重要工艺参数,加工电压过低,则用于电解的反应电流较小,加工效率不高;加工电压过高,反应电流增大,阳极溶解区域变大、定域性变差、杂散腐蚀严重,加工质量降低。本研究加工电压选取12 V获得的加工效果较令人满意。

3.3 参数优化后加工试验

由图7可知,当加工电压为12 V时,缝宽标准差的最小值出现在 $2.5 \mu\text{m/s}$,故选择加工电压为12 V,线电极进给速度为 $2.5 \mu\text{m/s}$,其他参数保持不变进行加工试验,加工4个等间距的正方形。利用复合电解液进行加工,获得实物如图11所示,从图中可以看出,工件上每个切缝轮廓均匀一致、成形精度较高,达到了预期实验目的,实现了多线电极在电解线切割加工中的应用,为多线电极电解线切割用于实际生产提供了前期研究。

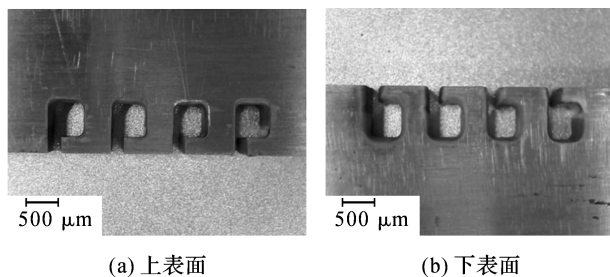
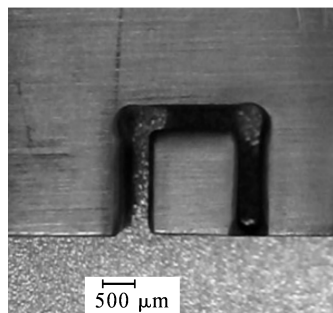


图11 复合电解液加工试验实物

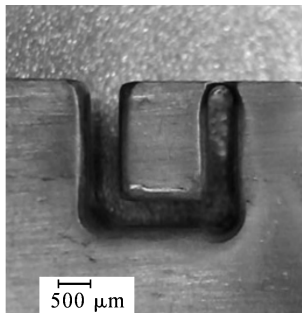
4 典型结构加工试验

由图5可知,在采用单相电解液进行电解线切割加工试验时,在加工电压为12 V、进给速度为 $3.5 \mu\text{m/s}$ 时,缝宽标准差最小,说明以此进给速度加工时,切缝轮廓均匀,加工质量最好。取加工电压为12 V,进给速度为 $3.5 \mu\text{m/s}$ 进行加工试验,加工的图形为边长4 mm的正方形的3条边。

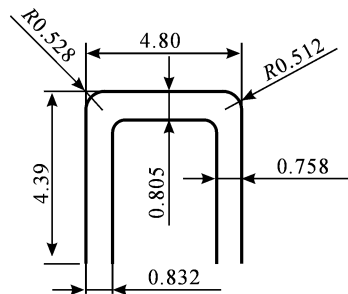
加工得到的实物如图 12(a)—(b)所示,从图中可以看出:工件上表面的切缝缝宽较均匀,有较小加工圆角;工件下表面定域性稍差,切缝宽度出现波动。将工件洗净烘干用投影测量仪测量工件的切缝



(a) 上表面



(b) 下表面



(c) 切缝尺寸(mm)

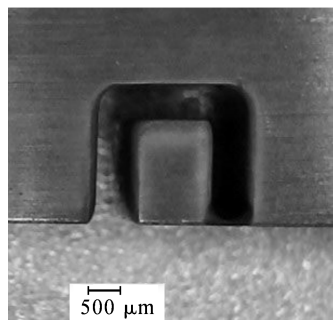
图 12 试加工加工试验实物及切缝尺寸

为提高加工精度,需考虑刀具半径(电解加工过程中轴向冲液的液柱的半径,近似为工件切缝宽度的一半)。在垂直方向取 0.805 mm 的一半约为 0.400 mm,水平方向取 0.832 mm 和 0.758 mm 之和的一半约为 0.800 mm,则引入刀补后的加工尺寸为:垂直方向 3.600 mm,水平方向 3.200 mm;调节流量开关使得沿线电极轴向喷出的电解液较为均匀的分布于线电极的圆周

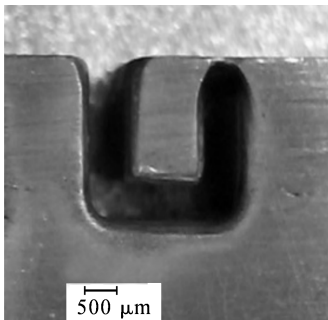
尺寸,得到平均切缝宽度尺寸如图 12(c)所示。缝宽波动是由于线电极的轴线与喷嘴的轴线不重合、沿线电极轴向冲液的液柱沿线电极圆周分布不均以及加工区电解液电导率不均导致的。

表面。

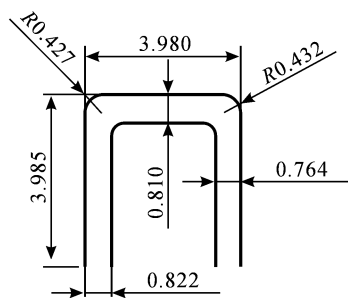
引入刀补半径后加工获得的实物如图 13(a)—(b)所示。可见工件上表面的切缝尺寸均匀一致,加工质量比较理想;工件下表面加工的定域性得到改善,切缝缝宽比较均匀。将工件洗净烘干用投影测量仪测量工件的切缝尺寸,得到切缝的尺寸如图 13(c)所示,与理论欲达到的边长 4.000 mm 相比分别相差 0.015 mm 和 0.020 mm。



(a) 上表面



(b) 下表面



(c) 切缝尺寸(mm)

图 13 引入刀补后加工试验实物及切缝尺寸

5 结 论

设计的多线电极张紧装置,具有结构简单、工作可靠等优点,有效减弱了加工过程中线电极抖动现象,遏制了短路的发生,提高了加工稳定性和加工精度;采用多线电极同时切割加工,加工效率得到提升。

单相电解液加工试验中先试加工以确定刀补,再引入刀补进行精确加工,使加工误差控制在 0.020 mm 内,满足了一般加工精度的要求,验证了该电解线切割加工用于实际零件加工的可行性。

复合电解液条件下的多线电极电解线切割加工

试验达到了预期的实验目的,在 5 mm 厚的不锈钢板上加工出了多个形状尺寸基本一致的图形,实现了多线电极电解线切割,提高了电解线切割的生产效率,为多线电极电解线切割加工应用于实际生产奠定了基础。

复合电解液下的加工质量与单相电解液的加工质量相比,因为电解液中 NaCl 的存在使得加工的定域性降低,缝宽变大,但是加工效率得到提升,且加工精度仍能满足一定的加工要求,在精度要求不是很高的情况下,利用复合电解液进行加工更可取。

经过一系列加工试验发现:采用多线电极切割加工所得工件上的每个切缝的切缝质量存在差

异,切缝的定域性有待进一步提高,为此需对多线电极的冲液装置做进一步研究,使加工区域流场分布更加均匀,从而获得更佳的加工精度和表面质量。

参考文献:

- [1] 白基成,郭永丰,刘晋春.特种加工[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006.
- [2] 朱兵,朱荻,曾永彬,等.电解线切割加工技术研究[J].中国机械工程,2010,21(8):963-967.
- [3] 朱晓龙,李湘生.基于脉冲电源的金属电化学线切割工艺研究[J].机电工程,2012,29(7):803-806.
- [4] 王峰,赵建社,干为民,等.阴极复合进给窄缝电解加工精度的试验研究[J].华南理工大学学报(自然科学版),2016,44(3):16-22.
- [5] BOXHAMMER M, ALTMANN SHOFER S. Model predictive control in pulsed electrochemical machining [J]. Journal of Process Control, 2014, 24(1): 296-303.
- [6] 于洽,曾永彬,徐坤,等.阳极振动往复运丝微细电解线切割试验研究[J].中国机械工程,2014,25(3):295-298.
- [7] 于洽,曾永彬,张海,等.阳极振动辅助微细电解线切割技术[J].机械工程学报,2012,48(23):178-183.
- [8] PAN Y, XU L Z. Vibration analysis and experiments on electrochemical micro-machining using cathode vibration feed system [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015, 16(1), 143-149.
- [9] WANG D Y, ZHU Z W, BAO J, et al. Reduction of stray corrosion by using iron coating in NaNO_3 solution during electrochemical machining [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 7(6): 1365-1370.
- [10] 相奎,李湘生,程松,等.金属电化学线切割工艺参数优化分析[J].机械工程师,2010(8):6-9.
- [11] WANG W, ZHU D, QUN S, et al. Effect of electrode insulation thickness on size accuracy of bored hole in ECD process [C]//9th International Conference on Process of Machining Technology Switzerland, 2009, 407/408: 667-671.
- [12] 李晶,安耿,刘仁智,等.钼丝抗拉强度影响因素分析[J].中国铝业,2010,34(2):49-52.

Experimental Research of Wire Electrochemical Machining Based on Multi-Wire Electrode

MA Zaiquan, LI Xiangsheng, CHEN Li, YANG Yu, ZHANG Shuai

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To enhance the processing stability and the processing efficiency in wire electrochemical machining, the multi-wire cutting device was designed. The device can clamp multi-wire electrode and achieve electrochemical machining of multi-wire electrode. A new multi-wire electrode tensioning device was used to decrease the vibration of electrode in the machining process. Wire electrochemical machining system of multi-wire electrode was applied for multi-wire cutting experiment to explore the influence rules of main technological parameters on machining quality. The experimental results show that the multi-wire electrode tensioning device effectively decreases the vibration of electrode in the machining process and improves the machining stability greatly. Meanwhile, the short-circuit phenomenon is avoided effectively. The machining efficiency may improve when multi-wire electrode is applied for cutting machining. Besides, compound electrolyte can also promote the machining efficiency.

Key words: multi-wire electrode; wire electrochemical machining; vibration of the wire electrode; tensioning device; processing efficiency

(责任编辑:康 锋)