

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.06.012

数控线切割钼丝抖动的工艺影响分析

谢冬和¹, 明 瑞², 李 湾³, 蔡 颂², 明兴祖²

(1. 湖南汽车工程职业学院 机电工程学院, 湖南 株洲 412001; 2. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007;
3. 国网湖北省电力有限公司 宜昌供电公司, 湖北 宜昌 443000)

摘 要: 对数控线切割机实施多次切割的工艺过程进行了分析, 认为影响产品质量的主要原因是运行中钼丝的动态稳定性较差。影响钼丝动态稳定性能的主要因素, 包括导轮的径向跳动及轴向窜动, 储丝筒的径向跳动, 上、下导轮间钼丝的抖动, 绕丝时预紧力不均匀等, 可采用隔断导轮跳动的传播路径、合理控制钼丝的运行速度、增设钼丝张紧装置等措施降低钼丝抖动。理论分析与试验结果表明, 通过对数控线切割机床进行适当改进并且采用适当的工艺方法, 在数控线切割机上可以实施多次切割工艺, 且加工后的产品质量满足工艺要求。

关键词: 数控线切割机; 钼丝运行; 动态分析; 工艺影响

中图分类号: TG484

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2019)06-0084-05

引文格式: 谢冬和, 明 瑞, 李 湾, 等. 数控线切割钼丝抖动的工艺影响分析[J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(6): 84-88.

Process Impact Analysis of Molybdenum Wire Jitter in WEDM

XIE Donghe¹, MING Rui², LI Wan³, CAI Song², MING Xingzu²

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Automobile Engineering Professional College, Zhuzhou Hunan 412001, China; 2. College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
3. Yichang Power Supply Company, Hubei Electric Power Company, Yichang Hubei 443000, China)

Abstract: Based on an analysis which has been made of the multiple cutting process of CNC wire cutting machines, it is considered that the main reason affecting product quality is the poor dynamic stability of molybdenum wires in operation. The main factors affecting the dynamic stability of molybdenum wire are radial run-out and axial movement of guide wheel, radial run-out of wire storage cylinder, jitter of molybdenum wire between upper and lower guide wheels, uneven pre-tightening force during wire winding, etc. Measures to be taken to reduce the jitter of molybdenum wire include breaking off the transmission path of the runout of guide wheel, reasonably controlling the running speed of molybdenum wire, adding the tensioning device of molybdenum wire, etc. The theoretical analysis and experimental results show that the multiple cutting process can be carried out on WEDM machine by improving the CNC WEDM machine tool and adopting appropriate process methods, with the product quality meeting the requirements.

Keywords: CNC wire cutting machine; molybdenum wire operation; dynamic analysis; process impact

收稿日期: 2019-04-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51975192, 51705141), 湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ5034, 2019JJ40075)

作者简介: 谢冬和(1964-), 男, 湖南邵东人, 湖南汽车工程职业学院高级工程师, 主要从事机械制造技术方面的教学与研究, E-mail: Xdh8868@163.com

通信作者: 明 瑞(1992-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学教师, 硕士, 主要从事数控技术方面的教学与研究, E-mail: 844153340@qq.com

0 引言

随着工业技术的快速发展, 对数控线切割机的切割质量及切割精度提出了更高要求, 而线切割机的运行精度以及钼丝的运行动态稳定性直接影响着切割质量^[1]。有研究者在数控线切割加工中发现, 在产品轮廓切割中产生的误差有 58% 是由机床的静态原因造成的, 而在重复切割中产生的误差有 34% 是由钼丝的运行原因造成的^[2]。正是由于这些不稳定因素的存在, 在数控线切割机床上实施单次切割得到的产品质量难以满足工艺要求, 还需经过其他精修工艺的加工才能达到产品图纸规定的要求。

本研究拟通过对数控线切割机加工中的钼丝运行状态进行理论分析, 并采取相应措施, 以提高切割中钼丝的动态运行质量, 使数控线切割能够实施多次切割工艺, 提高产品质量。

1 钼丝抖动对多次切割的影响

有研究者在对产品进行实际切割过程中发现, 在数控线切割机上实施多次切割时, 钼丝应具有良好的动态稳定性能^[3]。为提高切割效率并保证切割的顺利进行, 多次切割中的第一次切割要求采用大电流、大脉冲能量, 将余量快速去掉, 产生的切缝宽度要比普通一次切割宽才能将电蚀物快速排出。从第二次切割开始, 钼丝为单边切割状态(如图 1 所示), 运行阻力下降, 并受到不对称电场力的作用, 钼丝在切割过程中更易发生抖动现象。由于钼丝的运行抖动及电场力的推离作用, 导致多次切割中钼丝的实际切割中心偏移量 δ_2 难以精准计算, 与理论偏移量 δ_1 之间存在差值, 这个差值的大小会影响切割面的质量和精度, 差值越大, 表面精度越低。

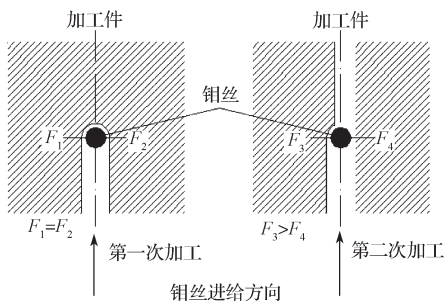


图 1 钼丝切割时的受力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of force acting on molybdenum wire in cutting operation

在实际切割过程中, 钼丝的运行受到下列因素的影响, 导致实际偏移量和理论偏移量不相等。

1) 机床的重复精度低。虽然数控线切割机采用了直线导轨和滚珠丝杠, 但驱动工作台的是普通电

机, 致使运行中的跟随精度低, 只能控制在 $\pm 2 \mu\text{m}$ 以内, 不能满足更高精度的切割要求, 故应采用跟随性能更好的伺服电机或步进电机。

2) 钼丝切割运行中抖动的影响。数控线切割机的中心偏移量是以静止状态时的钼丝直径中心为基准的, 当钼丝运行中发生抖动时, 其中心处于动态变化中, 两者间的差值瞬时变化。

如图 2 所示, 钼丝位置 1 为动态平衡位置, δ_1 为钼丝理论中心偏移量, 当钼丝在运行中因抖动偏向内侧(图中位置 2)时, 实际中心偏移量 δ_2 趋小, 不能对前次切割产生的条纹进行精修; 当钼丝因抖动及电场力作用远离切割面(图中位置 3)时, 实际切割中心偏移量会更大。两者的差值会因钼丝的抖动不断变化, 钼丝抖动越厉害, 差值越大, 切割不稳定性越严重, 短路及断丝的发生几率越高^[4]。由于钼丝抖动幅度时刻变化, 钼丝与切割机间的放电间隙不同, 施加在切割面上的电蚀力不一样, 在切割面上形成的放电凹坑大小也不一样, 即表面粗糙度不同^[5]。

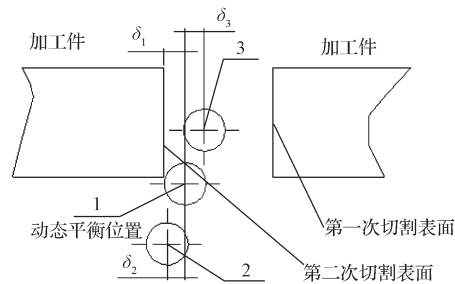


图 2 补偿量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of compensation amount

多次切割的工序次数越多, 钼丝运行抖动对切割面质量产生的影响越大^[6]。精修时, 钼丝中心的偏移量很小(抖动幅度远大于偏移量), 施加给钼丝与工件间的脉冲能量也很小, 多次切割的工艺次数宜采用 3~4 次。最后精修时, 钼丝中心偏移量仅 $5 \mu\text{m}$, 单个脉冲能量不大于 $10 \mu\text{J}$, 并要用微脉冲保证切割过程的稳定性和连续性。

2 影响钼丝动态稳定性的主要因素

2.1 导轮的径向跳动及轴向窜动

导轮的作用是保证钼丝在切割过程中的空间位置相对稳定, 但在快速往复运行中, 因制造及使用磨损原因, 导轮会发生径向跳动和轴向窜动, 钼丝会因此发生抖动现象。若导轮径向跳动及轴向窜动量过大, 运行速度过快, 则钼丝会从导轮槽中跳出。

2.2 储丝筒的径向跳动

储丝筒的功能是收放钼丝, 在线切割加工中, 储丝筒做往复直线旋转运动, 因制造原因, 其同轴度有

较大误差,运转中的径向跳动量较大,特别是在两端换向时产生的跳动量更大。转速越快,储丝筒的跳动量越大,这会对钼丝的运行稳定性产生很大影响。

2.3 上、下导轮间钼丝的抖动

钼丝往复运动产生的抖动是一种很复杂的组合运动:在频率上,有接近其固有频率的高频抖动,也有低频抖动;在方向上,既有垂直于运动方向的横向抖动,也有沿运丝方向的纵向抖动^[7]。

根据对数控线切割机的运丝系统进行分析得知,对钼丝运行影响较大的因素如下:

1) 钼丝直径。受钼丝直径的限制,绕丝时的预紧力不能太大,否则会降低其抗拉力,切割时易断丝;预紧力小则抖动频率的幅度大,切割时不稳定性增加,易短路。

2) 工作液流量及流速。工作液对钼丝的运行也有较大影响,工作液流量及流速不能过大,否则会对钼丝运行产生较大冲击,使其抖动加剧,影响钼丝的运行稳定性^[8]。

3) 钼丝运行速度。钼丝运行速度越大,抖动越严重,工件表面切割条纹越粗糙。

4) 导丝嘴孔径。普通的导丝嘴孔径为 13 mm,而钼丝直径为 0.18 mm,可见钼丝运行时的活动范围较大。

2.4 绕丝时预紧力不均匀

DK7732 型数控线切割机没有专门的紧丝装置,操作时需手动对钼丝进行紧丝,预紧力的大小由操作者凭感觉确定,很难做到均匀用力。切割中张力的变化造成储丝筒收丝端紧(抖动幅度小)、放丝端松(抖动幅度大)。钼丝在切割工件的同时,本身也会受到电蚀力的作用损耗而变细、伸长,其张紧力会逐渐降低,抖动幅度逐渐增大,稳定性随之下降,影响切割质量,如图 3 所示。在多次切割中,钼丝始终处于单边放电状态,被爆炸力推离切割面,钼丝越松,推离距离越大。

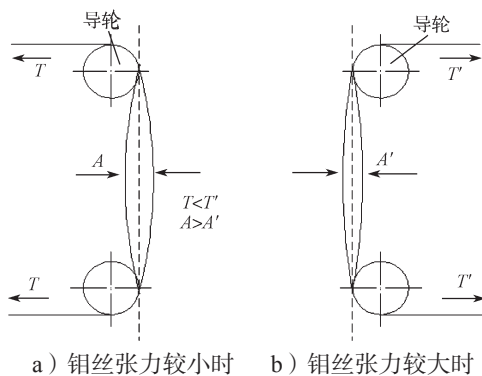


图 3 加工区钼丝状态

Fig. 3 Molybdenum wire state in processing zone

3 降低钼丝抖动的措施

3.1 隔断导轮跳动的传播路径

钼丝具有一定的刚性,静止时因受预紧力的作用而与导轮呈直线相切。在切割过程中,钼丝因往复惯力及电蚀力的作用逐渐变细、伸长,导轮的径向跳动会引起加工区钼丝空间位置变化及抖动幅度增大,切割面条纹变粗,可用加长的导丝嘴代替普通导丝嘴以解决这一问题。普通导丝嘴孔径为 13 mm(如图 4 所示),钼丝直径为 0.18 mm,钼丝活动范围较大,当采用孔径为 0.196 mm 的红宝石长嘴导丝嘴(如图 5 所示)时,可以有效降低钼丝运行时的抖动幅度,提高定位精度。

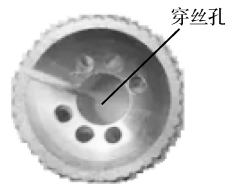


图 4 普通导丝嘴



图 5 长导丝嘴

Fig. 4 General guide nozzle Fig. 5 Long guide nozzle

3.2 合理控制钼丝的运行速度

在切割过程中,钼丝运行速度过快是导致其抖动的重要原因。钼丝运行速度越快,钼丝携带工作液的能力越强,电蚀物排出越快,切割速度也越快,但是会增加储丝筒以及导轮的径向跳动和轴向窜动,导致钼丝运行抖动加剧,钼丝可能会跳出导丝槽,发生短路及断丝现象^[9]。钼丝运行速度越低,钼丝抖动幅度越小,切割速度越低,但是当钼丝运行速度降低到一定值时,切割稳定性会下降,甚至不能连续进给,出现短路和断丝现象。实践表明,最后一次精修时若钼丝运行速度控制在 1 m/s 左右,则切割效果及稳定性较好。

3.3 增设钼丝张紧装置

钼丝张力大小及其稳定性会直接影响线切割质量:张力越小,钼丝往复快速运行产生的抖动幅度越大;切缝越宽,在相同电参数及钼丝运行速度条件下,切割速度降低,同时会使切割面条纹粗糙^[10],因此,应保持钼丝在切割中的张力恒定。

数控线切割机没有专门的钼丝张紧结构,增加钼丝张力主要靠绕丝时的预紧力和在切割一段时间后停机对钼丝的收紧来实现,这种方法费时且张紧力难以做到均匀控制,为此,本研究设计了一种恒张力机构(如图 6 所示),它依靠弹簧力作用使钼丝的张紧力保持在 10 N 左右,使钼丝紧贴在导电块上,保证了进电可靠,此张紧机构安装在线切割机的后部,

如图 7 所示。

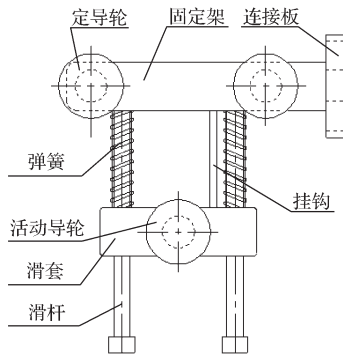


图 6 弹簧张紧机构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of spring tensioning mechanism

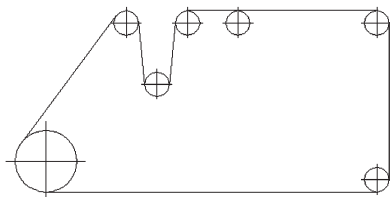


图 7 钼丝张紧机构安装位置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of installation position of tensioning mechanism of molybdenum wires

在实施多次切割工艺时, 第一次切割要采用大电流、大脉冲能量对工件进行快速切割, 第二次及第三次切割要采用更小的电流及脉冲能量对前次切割面进行精修。因采用的电参数很小, 故因放电引起的钼丝抖动可以忽略不计, 此时引起钼丝抖动的主要原因是上下导轮的径向跳动。可见, 降低钼丝运行速度及安装张紧机构可有效减小导轮的径向跳动, 使钼丝运行平稳, 导轮在不同丝速下空转时的跳动量 (μm) 如表 1 所示。

表 1 不同转速空转下抖动的相对值

Table 1 Relative values of jitter at different idle speeds

丝速 / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	抖动 / μm			
	未装张紧装置		加装了张紧装置	
	导轮 I	导轮 II	导轮 I	导轮 II
15	1	1	1	1
2	1/6	1/9	1/8	1/12

注: 表中导轮 I 为新导轮, 导轮 II 为旧导轮, 两导轮直径均为 42 mm。

4 理论分析与试验对比

4.1 两导轮间钼丝抖动频率的影响分析

除了可以用实践方法对钼丝的运行抖动进行研究外, 还可以从理论上对钼丝的运行抖动进行分析, 钼丝运行时的固有频率为

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho s}}$$

式中: f_n 为第 n 阶固有频率, 单位为 Hz;

L 为两导轮中心距, 单位为 mm;

ρ 为钼丝密度, 单位为 kg/m^3 ;

s 为钼丝截面积, 单位为 m^2 ;

T 为钼丝预紧力, 单位为 N。

根据实际的使用情况, 钼丝的直径为 0.18 mm, 预紧力为 10 N, 两导丝轮间的钼丝长度为 300 mm (该长度可以根据工件厚度调整), 钼丝的质量密度为 $10.2 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、截面积为 $2.54 \times 10^{-8} \text{ m}^2$, 将给出的这些数据代入上方公式, 可以得到钼丝第 1 阶以及第 2 阶的固有频率, 分别为 $f_1=327 \text{ Hz}$, $f_2=654 \text{ Hz}$ 。从结果中可以得知, 导丝轮间的钼丝越长, 其固有频率越低, 而振幅越大; 钼丝预紧力越大, 其固有频率越高, 而振幅越小。因此, 在切割时可以根据工件厚度调整合适的丝架高度及增大钼丝的预紧力以降低钼丝的运行振幅。

4.2 多次切割时钼丝运行速度的影响分析

多次切割中的第一次切割, 要采用较大的钼丝运行速度, 才能满足多次切割的工艺要求, 因此, 取第一次切割时的钼丝运行速度为 35 m/s, 导轮直径为 34 mm, 则可以求得导丝轮径向跳动的基本频率为

$$f = \frac{V}{\pi D} = \frac{35 \text{ m/s}}{3.14 \times 34 \times 10^{-3} \text{ m}} = 328 \text{ Hz}$$

在高钼丝运行速度运行条件下, 若导丝轮的基本频率与钼丝运行时的固有频率接近, 则易造成两者共振, 使得振幅叠加, 进而使钼丝的运行抖动现象更加严重, 最终导致切割条纹粗糙。对工件的切割面进行精修工艺时, 应采用较低的钼丝运行速度, 以降低导轮的径向跳动频率。若精修工艺时的钼丝速度不大于 2 m/s, 则此时的导丝轮的径向跳动频率 f 不大于 18.7 Hz, 该值远小于钼丝的固有频率^[1]。由此可见, 导丝轮的径向跳动以及钼丝的运行速度是造成钼丝抖动的重要原因。在精修工序时, 要选用较低的钼丝运行速度以及直径较大的导丝轮 (如直径为 42 mm 的导丝轮) 以降低导丝轮的径向跳动, 也即降低钼丝的运行抖动, 保证切割质量。

4.3 试验对比

为了测试钼丝运行速度对工件切割质量的影响程度, 在同一台数控线切割机上进行不同钼丝运行速度下的切割试验。切割时, 工件材料为 45 钢, 厚度为 60 mm、钼丝直径为 0.18 mm, 选择的脉宽为 48 μs , 脉间为 12 μs , 电流为 2.5 A, 电压为 100 V, 切割完成后用粗糙度测试仪对切割面进行对比测试, 所测得的数据如表 2 所示。

表2 钼丝切割速度对工件切割质量的影响结果

Table 2 Effects of molybdenum wire cutting speeds on cutting quality of work-pieces

试件	切割速度 / (m·s ⁻¹)	表面粗糙度 R _a /μm	表面条纹
1	20	2.68	条纹粗糙
2	15	2.15	条纹较粗
3	2	1.54	条纹细腻

为验证钼丝张紧装置对切割效果的影响,在同一台线切割机上,对两种运行状态下钼丝运行情况和工件切割情况进行试验,试验条件同上,所得到的影响结果数据见表3。

表3 张紧装置对工件切割质量的影响结果

Table 3 Effects of tension device on cutting quality of work-pieces

钼丝张紧装置	钼丝运行速度 / (m·s ⁻¹)	表面粗糙度 R _a /μm	表面条纹
加装	20	1.63	细腻
未装	20	2.28	较粗糙

从表2和表3所示试验结果得知,钼丝的运行速度越快,其运行中产生的抖动现象越严重,切割条纹越粗糙。加装了钼丝张紧装置后,钼丝的运行平稳性提高,表面粗糙度降低,切割面条纹细腻。

5 结语

通过对DK7732型数控线切割机的切割过程进行工艺分析,得知影响切割质量的主要原因是钼丝运行中的动态稳定性较差,而影响钼丝运行动态稳定性的主要因素有导轮的径向跳动、储丝筒的径向跳动及运行中钼丝张力的下降等。理论分析和试验结果均表明,采用高精度的导轮及储丝筒轴承、加装钼丝张紧装置,并采用合适的钼丝运行速度,能有效降低DK7732型数控线切割机在运行中的钼丝抖动,提高切割稳定性,通过实施多次切割工艺,切割的产品质量能够满足工艺要求。

参考文献:

- [1] 杨业成, 郭钟宁. 微细电火花线切割走丝系统的设计[J]. 机电工程技术, 2017, 46(9): 39-43.
YANG Yecheng, GUO Zhongning. Design on Wire Winding System of Micro-WEDM[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2017, 46(9): 39-43.
- [2] 李文平. 快走丝电火花线切割大厚度工件的电参数设置研究[J]. 现代制造技术与装备, 2018(8): 18, 20.
LI Wenping. Research on the Setting of Electrical Parameters for Wire-Electrode Cutting of Large Thickness Workpieces[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2018(8): 18, 20.
- [3] 王贤勇, 吴汉卿. 高速走丝电火花线切割机床发展现状及趋势[J]. 模具制造, 2016, 16(10): 80-81.
WANG Xianyong, WU Hanqing. High Speed WEDM Present Situation and Development Trend[J]. Die & Mould Manufacture, 2016, 16(10): 80-81.
- [4] 李璇, 罗福源, 王成. 线切割断丝保护方法研究与改进[J]. 机床与液压, 2016, 44(19): 18-24.
LI Xuan, LUO Fuyuan, WANG Cheng. Research and Improvement of the Method for Wire Broken Protection in WEDM[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(19): 18-24.
- [5] 朱派龙. 特种加工技术[M]. 北京: 北京大学出版社, 2017: 25-48.
ZHU Pailong. Special Processing Technology[M]. Beijing: Beijing University Press, 2017: 25-48.
- [6] 吴勇. 大厚度工件的多介质电火花线切割多次切割实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018.
WU Yong. Experimental Study on Multi Cutting Technology in Multi-Medium of WEDM for High Thickness Workpiece[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2018.
- [7] 宋新华, 宋斌, 周金鑫. 快走丝线切割电参数的研究[J]. 科技视界, 2016(14): 83, 94.
SONG Xinhua, SONG Bin, ZHOU Jinxin. Study on Electrical Parameters of Fast-Cut Wire Cutting[J]. Technological Horizon, 2016(14): 83, 94.
- [8] 李月明, 蔡广平. 基于快走丝电火花线切割加工中工作液的使用情况研究[J]. 当代化工研究, 2015(4): 41.
LI Yueming, CAI Guangping. Based on Fast Walking Silk Wedm Processing in the Case Study of the Use of Working Liquid[J]. Chemical Intermediate, 2015(4): 41.
- [9] 谢冬和. 快走丝线切割加工中断丝问题的技术改进[J]. 模具工业, 2016(3): 68-70.
XIE Donghe. Technology Improvement on the Wire Breaking in Fast Wire Cutting Machine[J]. Die & Mould Industry, 2016(3): 68-70.
- [10] 冯东文. 快走丝电火花线切割加工试验研究[J]. 广西轻工业, 2011(8): 57-58.
FENG Dongwen. Experimental Study on Wire-Cutting Machining of Fast Wire[J]. Guangxi Journal of Light Industry, 2011(8): 57-58.
- [11] 谢冬和. 快走丝线切割机的技术改进[J]. 制造技术与机床, 2018(9): 112-114.
XIE Donghe. Technical Improvement of Fast Wire Cutting Machine[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2018(9): 112-114.

(责任编辑: 廖友媛)