304 不锈钢电火花线切割加工表面性能研究

李晓舟，孙宇博，许金凯，黄飞，姜倩

（长春理工大学 机电工程学院，长春 130022）

摘 要：目的 研究电火花线切割工艺对金属材料加工表面质量的影响规律，分析加工表面的机械性能。**方法** 利用电火花线切割加工技术，对 304 不锈钢工件进行表面切割试验，应用马尔轮廓测量仪、扫描电镜、超景深电子显微镜及纳米压痕仪观察电火花加工表面的粗糙度变化规律和表面微形貌特征，获取横截面纳米硬度变化曲线。设计正交试验，获得最优加工参数。**结果** 脉冲宽度和峰值电流对奥氏体不锈钢加工表面形貌的形成机制有显著影响，加工表面粗糙度受电参数的影响较大，加工表面的表层及次表层组织主要由塑性变形层与回火多相组织层共同构成，厚度与纳米硬度的变化受电参数的影响较大。**结论** 电参数对表面质量的影响程度顺序为脉冲宽度、峰值电流、放电间隔，为得到较优加工表面层，应优先选择脉冲宽度为 16 μs，放电间隔为 96 μs，峰值电流为 1.5 A 的工艺参数组合。单个脉冲能量对加工层的厚度以及表层的纳米硬度呈现出近似线性规律。

关键词： 电火花线切割；表面质量；304 不锈钢

中图分类号： TG487 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3660(2015)06-0104-05

DOI： 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.06.020

Research on 304 Stainless Steel Surface Properties by Wire Electrical Discharge Machining

LI Xiao-zhou, *SUN Yu-bo*, *XU Jin-kai*, *HUANG Fei*, *JIANG Qian*

(College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the influences of W-EDM process on the surface quality of materials, analyze the mechanical properties of the machined surface. **Methods** The wire electrical discharge machining was used to conduct the surface cutting test of 304 stainless steel. The profilometer, scanning electron microscope (SEM), electron microscope and nanoindentation were used to examine the variation pattern of surface roughness and surface micro-morphology and obtain the micro and nano-hardness curve of electric discharge machining (EDM). The orthogonal experiment was designed to obtain the optimal parameters. **Results** The machining pulse width length and the peak current of austenitic stainless steel processing had a significant effect on the formation mechanism of surface morphology. The surface roughness was greatly influenced by electrical parameters. The surface and the subsurface tissues were mainly composed of the layer of plastic deformation and the layers of tempered multiphase. Changes were great in the thickness and the nano-hardness due to the influence of the electrical parameters. **Conclusion** Electrical parameters by

收稿日期： 2015-01-08；**修订日期：** 2015-02-03

Received: 2015-01-08; **Revised**: 2015-02-03

基金项目： 国家自然科学基金资助项目（51305043）

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51305043)

作者简介： 李晓舟(1963—)，男，黑龙江人，博士，教授，主要研究方向为先进制造。

Biography: LI Xiao-zhou(1963—), Male, from Heilongjiang, Doctor, Professor, Research focus: advanced manufacturing technologies.

their effects on the surface quality in order were pulse width, peak current, and discharge interval. In order to obtain the optimum machining surface layer, priority should be given to select pulse width 16 μs, discharge interval 96 μs, peak current of 1.5 A as the processing parameters. Single pulse energy exhibited a nearly linear association with thickness and nano-hardness of the processed layer.

KEY WORDS: wire cut electrical discharge machining (WEDM); surface quality; SUS304 stainless steel

社会经济的发展带动了汽车行业、高科技电子产业、航空航天技术的飞速提升,对加工制造业提出了更高的要求[1],零件的微型化、复杂化成为发展的趋势。电火花技术的出现能更好地满足复杂微小零件产品的加工制作,而产品的可靠性与耐用性则取决于零件的表面质量与表面性能[2]。在电火花加工中,如果电火花参数选择不当,会导致零件的表面质量差,性能与使用寿命降低。因此研究电火花加工的表面质量变化,充分认识加工过程中脉冲宽度、放电间隔、峰值电流等参数对表面质量与性能的影响,使零件加工更能满足产品设计与使用需求尤为重要[3]。

文中主要通过电火花线切割 304 不锈钢试验,考查不同的工艺参数加工后的表面质量指标变化,阐明关键加工参数对加工表面的影响规律。为建立和完善电火花线切割的工艺设计理论,指导奥氏体不锈钢的高性能电加工生产实践,提供必要的试验基础与理论依据。

1　试验设计与结果分析

1.1　正交试验设计

正交试验设计是利用正交表来安排与分析多因素试验的一种设计方法[4],结论可靠并且能很好地表征电参数对表面粗糙度的影响规律。设计 3 因素 3 水平试验方案,以表面粗糙度 *Ra* 为试验指标,试验的因素和水平见表 1。

表 1　因素水平表

Tab.1 Factors and levels

试样编号	脉冲宽度/μs	脉冲间隙/μs	脉冲电流/A
1	16	64	1.5
2	24	96	2.5
3	32	128	3.5

按照正交表,对 304 不锈钢试件进行了 9 次表面加工实验,制作成 20 mm×5 mm×2 mm 的试件,实验设备为金马 DK7732 型电火花线切割机,采用的电极丝为冷拉钼丝,直径为 0.12 mm,采用电极丝跟负极相连,工件跟正极相连的加工方式。工作液是佳润 JR3A 牌乳化液,空载电压 V=70 V。实验加工电参数及加工后表面粗糙度应用马尔表面轮廓测量仪测定,见表 2。

表 2　试验数据表

Tab.2 Experimental data

试验编号	脉冲宽度/μs	脉冲间隙/μs	峰值电流/A	粗糙度/μm
1	16	64	1.5	2.2
2	16	96	2.5	2.5
3	16	128	3.5	2.8
4	24	64	2.5	3.7
5	24	96	3.5	3.9
6	24	128	1.5	3.4
7	32	64	3.5	5.2
8	32	96	1.5	4.3
9	32	128	2.5	4.7

1.2　试验结果分析

极差分析可以反映因素的水平变化引起的结果差异。极差大的因素,意味着其不同水平给指标所造成的影响较大,极差越大因素的影响越显著[5]。通过对试验结果进行极差分析,就可以对各因素的影响程度进行排序,进而选择出最优参数。极差分析结果见表 3。

表 3　极差分析表

Tab.3 Range analysis table

因素		A(脉冲宽度)	B(脉冲间隙)	C(峰值电流)
粗糙度	K_1	2.5	3.7	3.3
	K_2	3.667	3.567	3.633
	K_3	4.733	3.633	3.967
		2.233	0.133	0.1
		A_1	B_2	C_1
			A>C>B	

从表 3 中可以看到,影响表面粗糙度的因素依次

是脉冲宽度、峰值电流、放电间隔。使表面粗糙度达到最好的参数组合是 $A_1B_2C_1$，即脉冲宽度 16 μs，放电间隔 96 μs，峰值电流 1.5 A。

1.3 表面粗糙度与脉冲宽度的对应关系

绘制粗糙度与脉冲宽度的关系图，如图 1 所示。

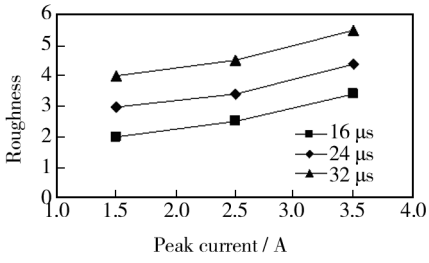


图 1 表面粗糙度与峰值电流变化曲线

Fig. 1 Curve diagram of surface quality along with peak current

图 1 表明电火花加工表面的表面粗糙度随着脉冲宽度的增大而增大。在电火花加工过程中，单个脉冲放电能量决定加工的工艺指标，而脉冲宽度是决定单个脉冲放电能量的主要因素，如式(1)所示[6]。

$$E = \int_0^t u(t) i(t) \mathrm{d}t \tag{1}$$

式中：E 为单个脉冲能量，$u(t)$ 为间隙瞬时放电电压，$i(t)$ 为间隙瞬时放电电流，t 为脉宽表示脉冲放电延续时间。

2 加工表面层研究

2.1 表面微结构

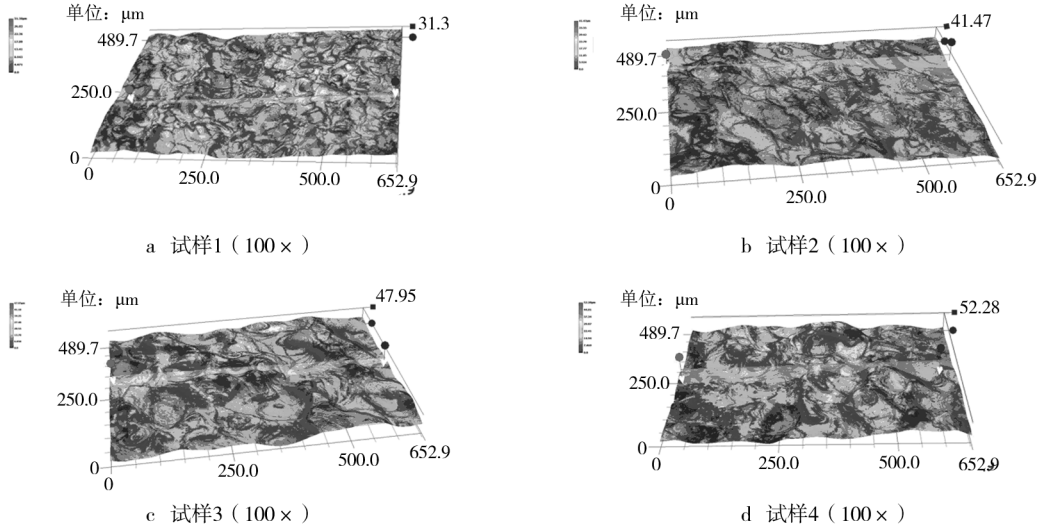
电火花线切割加工的原理是通过电极丝与工件之间不断地脉冲性火花放电，在放电通道内产生的瞬时高温使材料融化甚至蒸发，从而形成一个小坑，如此周而复始高频循环，工件表面材料不断被蚀除，同时产生的无数小坑和凸起组成了一个新的加工表面，形成蜂窝网状结构，具有良好的润湿性与耐冲蚀性[8,10]。

在不同的电参数下(见表 4)加工 304 不锈钢，使用超景深显微镜观察其表面变质层微观结构，观察结果如图 2 所示。

表 4 电加工参数表

Tab. 4 Processing parameters

试样编号	脉冲宽度 /μs	脉冲间隙 /μs	峰值电流 /A	粗糙度 /μm
1	8	32	0.5	2
2	16	64	1.5	2.2
3	24	96	2.5	3.8
4	32	128	3.5	5.0



a 试样1（100×） b 试样2（100×）

c 试样3（100×） d 试样4（100×）

图 2 不同电参数下加工得到的试件表面形貌

Fig. 2 Pictures of the specimen´s surface at different electric parameters

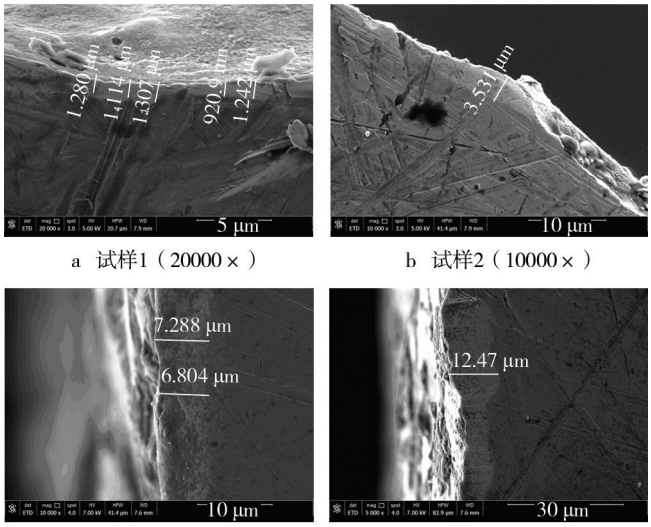
从图 2 可以看出：试样 1 的表面，电蚀坑直径较小，深度较浅，凸起较低，蜂窝网状结构排列较为紧密。当脉冲宽度、放电间隔和峰值电流增大时，试件表面的电蚀坑直径变大，深度加深，凸起增高，结构排列离散性大。由此可见改变电火花线切割的加工参数，可得到不同的表面微观结构，即电蚀坑尺寸大小、深度和凸起物数量的不同。

电火花线切割加工后的表面会形成许多微坑微

凸起结构,这些微凸起结构能够减小摩擦接触面积。微凹坑结构的容纳作用可以减少摩擦表面之间的磨粒存留量,温升形成的氧化膜能够降低微凸起接触界面的抗剪强度,并且将摩擦过程由二体摩擦转变为三体摩擦,从而降低摩擦系数,有效地减少磨粒磨损和粘着磨损,抗冲蚀性能也得到一定的提升[11—12]。

2.2　表面变质层厚度

金属在电火花加工过程中,由于工件表面残留熔化成分的变化和因骤冷骤热的作用,在工件表面形成变质层[13—14]。对上述试件进行镶嵌、研磨、抛光,用扫描电镜观察试件剖面,如图 3 所示。



a　试样1（20000×）　　b　试样2（10000×）

c　试样3（10000×）　　d　试样4（5000×）

图 3　不同电参数电加工后的扫描电镜照片

Fig. 3 SEM pictures of the specimen surface at different electric parameters

从图 3 可以看到:1)试件的表面变质层为重熔层,位于工件表面上层;在电加工过程中,由于工件表面残留熔化成分的变化和因骤冷骤热的作用,在工件表面形成了变质层[15—16];同时熔化和再凝固的时间非常短促,且电火花放电坑及附着物的落点是随机分布的,故试件表面变质层的厚度是不均匀的;2)单个脉冲能量越大,即脉冲宽度越宽,表面变质层的厚度就越大;单个脉冲能量减小时,脉冲宽度越窄,重熔层越薄。大部分金属不是熔化而是气化后在压力的状态下被抛出蚀除,并不会残留在工件表面;脉冲宽度越宽,能量向内传递越多,变质层越厚。变质层对产品的强度与硬度有影响,必须严格控制厚度,一般规定不大于 20 ~ 30 μm。试验中所采用的电参数,变质层厚度为 1.2,3.5,7.0,12.0 μm。

3　加工表面层纳米力学响应研究

由于线切割是利用瞬间放电能量的热效应,使工件材料熔化、蒸发达到尺寸要求的加工方法,会产生较为强烈的热效应,同时线切割的工作液多采用具有介电作用的液体,因此在加工过程中伴有一定的电解作用。在电加工中,脉冲能量随着峰值电流的强度变大而增强,温度影响区在逐渐增大,对表面纳米硬度有一定的影响。

为了研究电加工后的 304 不锈钢表层纳米硬度变化趋势,分析脉冲能量对纳米硬度的影响规律,选择 4 组参数在新的试件上进行表面加工,试件进行镶嵌、研磨、抛光,对变质层利用 Nano Indenter G200 纳米测试系统,使用三棱锥形的玻氏压头,采用位移控制方法,设定压头压入深度为 2.5 μm,按照《仪器化纳米压入实验方法》标准(GB/T 22458—2008)[17],从抛光面对不锈钢试样进行表层力学性能测定,获得表层纳米硬度,实验结果见表 5。

表 5　纳米硬度试验数据表

Tab. 5 Nano-hardness test data

试样编号	脉冲宽度/μs	脉冲间隙/μs	峰值电流/A	脉冲能量/J	纳米硬度/GPa
1	8	32	0.5	0.0004	1.985
2	16	64	1.5	0.0024	1.888
3	24	96	2.5	0.006	1.758
4	32	128	3.5	0.0112	1.237

根据实验结果可以得到,相比于本体材料,亮白层硬度有显著降低的势,即单个脉冲能量越小,表面变质层的硬度越接近基体,放电能量越大,表层纳米硬度就越小。重结晶区域的纳米硬度与脉冲能量的变化呈近似线性关系。由于在切割金属过程中,工具电极与金属表层之间产生极高的温度,使得重铸层的厚度产生变化,硬度也随之改变。金属的散热能力、高速切割的冷却速率以及金属本身的导电功率都是重铸层硬度变化的原因。重铸层越厚,其硬度值越偏离基体。加工中产生的重铸层越薄,其硬度值越接近基体。

4　结论

通过设计正交试验,采用电火花线切割在不同电

参数下加工 304 不锈钢得到的表面特性规律如下。

1）在稳定加工的前提下，电加工参数对试样表面粗糙度的影响程度依次为：脉冲宽度>峰值电流>放电间隔，用短脉宽参数和小电流可以获得良好的表面粗糙度。

2）在稳定加工的前提下，表面形貌变化程度受脉冲能量影响显著。单个脉冲能量对加工层的厚度呈现出近似线性关系。

3）厚度为 1.2 ~ 3.5 μm 的重铸层纳米硬度更接近基体，而 7 ~ 12 μm 的重铸层纳米硬度偏离基体的硬度较大。脉冲能量的变化与表面层纳米硬度呈线性变化趋势。

参考文献

[1] 曹凤国，翟力军，伏金娟. 电火花加工技术[M]. 北京：化学工业出版社，2005.
CAO Feng-guo，ZHAI Li-jun，FU Jin-juan. EDM Technology [M]. Beijing：Chemical Industry Press，2005.

[2] 徐东，胡荣奖，方志刚. 电火花表面处理技术在模具上的应用[J]. 装备制造技术，2010(4)：151—152.
XU Dong，HU Rong-jiang，FANG Zhi-gang. The Application of Electron-spark Surface Treatment Technology on Moulds [J]. Equipment Manufacturing Technology，2010 (4)：151—152.

[3] 吕镖，胡振峰，汪笑鹤，等. 电流密度对镍镀层结构和性能的影响[J]. 中国表面工程，2013，26(4)：66—71.
LYU Biao，HU Zhen-feng，WANG Xiao-he，et al. Effect of Current Density on the Microstructure and Properties of Plated Nickel Coating [J]. China Surface Engineering，2013，26(4)：66—71.

[4] 刘瑞江，张业旺，闻崇炜，等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理，2010(9)：52—55.
LIU Rui-jiang，ZHANG Ye-wang，WEN Chong-wei，et al. Study on the Design and Analysis Methods of Orthogonal Experiment [J]. Experimental Technology and Management，2010(9)：52—55.

[5] 张建方. 混合位级正交试验设计的极差分析方法[J]. 数理统计与管理，1998，17(6)：31—37.
ZHANG Jian-fang. Methods of Range Analysis in Orthogonal Experimental Design of Mixed Levels[J]. Mathematical Statistics and Management，1998，17(6)：31—37.

[6] 狄士春，黄瑞宁，于滨，等. 慢走丝电火花线切割脉冲电源的研究现状及发展趋势[J]. 航空精密制造技术，2004(6)：12—16.
DI Shi-chun，HUANG Rui-ning，YU Bin，et al. Research Status and Development Trend of LSWEDM Pulse Generator [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology，2004(6)：12—16.

[7] LIAO Y S. A Study to Achieve a Fine Surface Finish in Wire-EDM[J]. Journal of Materials Processing Technology，2004，149：165—171.

[8] LU Yao. Loading Capacity of a Self-assembled Superhydrophobic Boat Array Fabricated via Electrochemical Method [J]. Micro Nano Letters，2012，7(8)：1750—0443.

[9] 崔海，郭黎滨，张彬，等. 微细电火花线切割加工表面摩擦性能的研究[J]. 哈尔滨工程大学学报，2013(10)：1316—1320.
CUI Hai，GUO Li-bin，ZHANG Bin，et al. Research on Tribological Properties of Micro Wire Electrical Discharge Machining Surface[J]. Journal of Harbin Engineering University，2013(10)：1316—1320.

[10] 崔海，郭黎滨，张彬，等. 微细电火花线切割与超精磨削加工表面摩擦性能比较[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2013(9)：3687—3692.
CUI Hai，GUO Li-bin，ZHANG Bin，et al. Tribological Property Comparison Between Micro-WEDM and Super Finishing Grinding Machining Surfaces[J]. Journal of Central South University (Science and Technology)，2013(9)：3687—3692.

[11] HUANG Ching-an. The Surface Alloying Behavior of Martensitic Stainless Steel Cut with Wire Electrical Discharge Machine[J]. Applied Surface Science，2006(252)：2915—2926.

[12] 陈康，赵玮霖. 304 奥氏体不锈钢氮离子注入层的组织与性能研究[J]. 表面技术，2011，40(2)：18—20.
CHEN Kang，ZHAO Wei-lin. Study on Organization and Performance of Nitrogen Ion Implantation Layer of 304 Austenitic Stainless Steel [J]. Surface Technology，2011，40(2)：18—20.

[13] VAZ C M. Design of Scaffolds for Blood Vessel Tissue Engineering using a Multi-layering Electrospinning Technique [J]. Acta Biomater，2005，1(5)：575—582.

[14] THIERRY D. Superhydrophobic Surfaces by Electrochemical Processes[J]. Advanced Materials，2013，25(10)：1378—1394.

[15] LI J Z. Influence of Microstructure of Alloy on the Machining Performance of Micro EDM[J]. Surface and Coatings Technology. 2013，8(15)：460—465.

[16] ARGYRO N. The Effect of Electro Discharge Machining (EDM) on the Corrosion Resistance of Dental Alloys[J]. Dental Materials，2010，26(12)：237—245.

[17] 刘美华，王静，王东爱. 对压痕硬度试验方法的分析研究[J]. 工程塑料应用，2005，33(7)：39—42.
LIU Mei-hua，WANG Jing，WANG Dong-ai. Analysis of Test Methods for Indentationhardness [J]. Engineering Plastics Application，2005，33(7)：39—42.