

# 线切割电参数对加工能耗及粗糙度的影响研究

郑 军,黄志强,刘梦琦

(浙江科技学院 机械与能源工程学院,杭州 310023)

**摘 要:** 电火花线切割加工过程中的电参数(脉宽、脉间距、跟踪、限速等)影响加工过程能量消耗和加工零件的表面质量。通过建立测试平台,对 DK7740D 电火花线切割机床加工过程的相关数据进行采集,分析脉宽、脉间距、跟踪、限速等 4 个参数对加工能耗和加工零件表面粗糙度的影响情况,得知电参数对加工过程能耗、粗糙度的影响程度,为实现低能耗和低表面粗糙度提供电火花线切割参数优选依据。

**关键词:** 能耗;影响分析;电参数;粗糙度

中图分类号: TG661

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2018)05-0380-06

## Study on impacts of electrical discharge parameters on processing energy consumption and roughness

ZHENG Jun, HUANG Zhiqiang, LIU Mengqi

(School of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

**Abstract:** Electrical parameters in the process of WEDM (wire electrical discharge machining), including pulse width, pulse spacing, tracking, speed limit, etc. affect its energy consumption and the surface quality of machined parts. Through establishment of the test platform, the paper collected relevant data of DK7740D WEDM process, analyzed impacts of four parameters: pulse width, pulse spacing, tracking and speed limit on the processing energy consumption and the surface roughness of machining parts, and calculated the influencing degree of electrical parameters on the machining process of energy consumption and roughness, which provided a reference for realization of low energy consumption and low surface roughness with WEDM parameter optimization.

**Keywords:** energy consumption; impact analysis; electrical parameters; roughness

---

**收稿日期:** 2017-12-11

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51505428);浙江省自然科学基金项目(LY18E050007);浙江省食品物流装备技术研究重点实验室开放基金项目(KF2016015zd)

**通信作者:** 郑 军(1981— ),男,浙江省台州人,副教授,博士,主要从事可持续设计与制造、特种加工工艺研究。  
E-mail: zhengjun@zust.edu.cn。

电火花线切割加工作为现代工业一种重要的加工方式,与传统加工方式相比具有突出的优势。但其效率低、损耗大,这成为阻碍其发展的重要因素<sup>[1]</sup>。目前,环境和能源问题已成为全球性的重要问题,《中国制造 2025》更是明确地将绿色制造列入五大工程之一,指出要加大先进节能环保技术、工艺和装备的研发力度<sup>[2]</sup>。

对制造业能耗的研究一直都在开展中,如:Dietmair 等<sup>[3]</sup>对制造过程中的能量进行了预测、评估、优化和建模仿真等研究,提出制造过程能量预测模型;Dornflou 等<sup>[4]</sup>在研究制造过程的资源利用的基础上,建立了制造过程资源利用的监测系统体系结构;Cao 等<sup>[5]</sup>对制造系统的碳排放动态特性及优化进行了研究,提出机械制造系统碳排放动态特性模型和面向机械加工工艺的低碳优化方法。针对电火花线切割机床能耗的研究却相对较少,哈尔滨工业大学特种加工及机电控制研究所于 2000 年提出了两级结构 PWM 控制节能式脉冲电源,有效地将电能利用率提高到 70% 左右<sup>[6]</sup>;Ho 等<sup>[7]</sup>研究了对火花放电的监测和控制,在提高能量利用率的基础上提高了加工效率。

表面粗糙度作为评判电火花线切割加工质量的重要指标之一,研究较多,如:杨蕾等<sup>[8]</sup>研究电火花线切割加工中脉冲宽度、峰值电流、脉冲间隔及工件厚度对表面粗糙度的影响;蒋军等<sup>[9]</sup>研究了放电电流对电火花线切割精加工表面粗糙度的影响,认为脉宽的影响最大;王斌等<sup>[10]</sup>的研究表明,脉宽越大,粗糙度越大,加工效率越高。

电火花线切割加工中,脉宽、脉间距、跟踪、限速是在机床操作中可以调整来优化加工的电参数。因此,笔者对它们与能耗、表面粗糙度的关系进行探究,欲找出其对能耗和表面粗糙度的影响及影响程度,以便为选取最优加工方案提供参考。

## 1 电火花线切割加工特点

电火花线切割加工是利用连续移动的细金属丝(称为电极丝)作电极,对工件进行脉冲火花放电蚀除金属、切割成型。其加工精度高,无切削力,不与工件直接接触,易于加工复杂、精密、高硬度的零件<sup>[11]</sup>。

脉宽的大小决定了放电凹坑的大小,增加脉宽会增加单个脉冲的放电时间,使加工稳定,提高加工效率,同时因单脉冲时间长,放电凹坑大,降低了零件的表面质量。脉间距即放电加工的间歇时间,当其他工艺参数为定值时,减小脉间距会增大平均加工电流,加工速度提高,减少放电过程的消除电离时间,从而引起工件表面的烧伤,降低加工质量。跟踪是由放电间隙取得一个间隙电压,以此电压去控制一个频率与电压接近线性变化的振荡器,它输出的脉冲直接作为控制器的运算和进给启停信号,当间隙电压超过设定值则机床进给,实现对间隙大小的限制,从而控制进给速度。限速指的是切割加工时,对钼丝走丝速度的限制。加工限速越大,机床切割速度越快,但是过大的加工限度则会使钼丝对零件的电蚀不充分,影响加工零件表面质量;反之,过小的限速则会使钼丝对零件过分电蚀,不仅不会提高加工零件表面质量,反而由于电蚀产物过多,影响排水、散热,造成加工零件表面质量下降。

## 2 电参数对加工能耗及粗糙度影响试验

### 2.1 试验方案

本试验的研究平台为宝玛数控线切割机床,型号为中走丝电火花线切割机 DK7740D。切割液为水基工作液 BM-4,水基与水的体积配比为 1:30;切割电极丝采用  $\Phi 0.18$  钼丝,切割材料为 5 mm 厚 45 # 钢热轧板,切割形状为 50 mm $\times$ 50 mm 的正方形。

采用正交试验对多组加工参数与能耗的影响进行分析。经过选择及对切割机床的调整,最终确定控制因素(即加工参数)包括脉宽 A、脉间距 B、跟踪 C 和限速 D 4 个因素,其他因素如加工电流、电压等保持不变。试验中各因素又分别设置 3 个水平因素,故选择  $L_9(3^4)$  正交试验表。中走丝线切割加工控制因素不同水平设置见表 1。

表 1 中走丝线切割加工控制因素不同水平设置

Table 1 Control factors of WEDM set at different levels

水平	$A/\mu\text{s}$	$B/\mu\text{s}$	$C/(\text{步} \cdot \text{s}^{-1})$	$D/(\text{步} \cdot \text{s}^{-1})$
1	10	10	10	300
2	20	15	20	400
3	30	30	30	500

能耗测量平台的硬件采用郑军等<sup>[12]</sup>提出的能耗检测平台,软件采用 LabVIEW 与硬件关联,实现线切割机床能耗的实时采集,并辅以数据库 SQL Server,完成二者之间的连接以实现大量能耗数据的采集及存储,再通过 Excel 进行处理分析。试验过程如图 1 所示,在机床进行切割时,传感器不断采入实时的电压和电流信号并传入数据采集板卡,有数据采集板卡完成 A/D 转换并将信号传输入计算机。计算机中的 LabVIEW 接收电信号并按照程序对数据进行初步计算,得到功率。图 2 即是根据 LabVIEW 采集到的功率与相对时间的数据绘制的关系图。再经由数据库 SQL Server 对大量数据进行存储。试验结束后,将数据从数据库导出,由 Excel 对其进行处理分析得到试验总能耗。图 3 即是能耗与相对时间的关系图,曲线最高点即是总能耗。

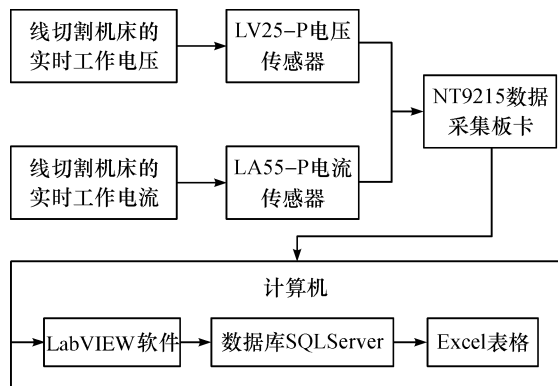


图 1 能耗测量平台原理

Fig. 1 Principle of energy consumption measurement platform

使用 TR100 表面粗糙度仪对加工完成的工件进行表面粗糙度测量。

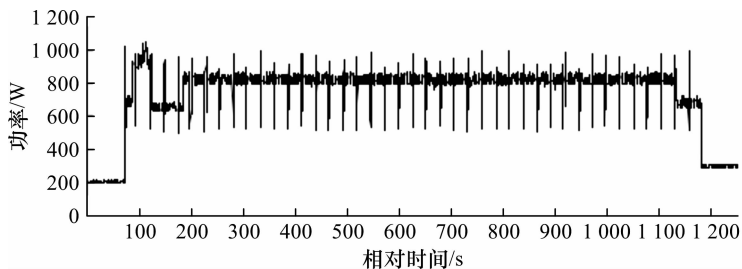


图 2 实时功率与时间的关系

Fig. 2 Relationship between real-time power and time

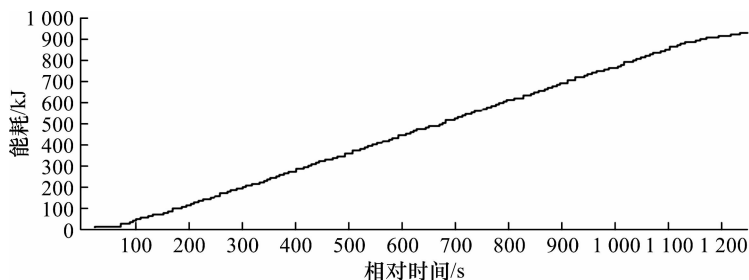


图 3 能耗与时间的关系

Fig. 3 Relationship between energy consumption and time

## 2.2 试验数据处理

### 2.2.1 加工过程能耗的数据处理

工件加工完成后,根据能耗检测平台反馈的数据进行整理,求得其加工总能耗,按照编号填入试验数据表,如表 2 所示。

表2 试验数据  
Table 2 Experimental data

序号	各因素对应水平				能耗/W	表面粗糙度
	A	B	C	D		
1	1	1	1	1	383 598.35	3.22
2	1	2	2	2	707 600.15	2.92
3	1	3	3	3	1 227 740.27	2.64
4	2	1	2	3	702 744.78	3.64
5	2	2	3	1	1 430 666.52	3.54
6	2	3	1	2	803 124.41	3.80
7	3	1	3	2	1 461 076.41	2.80
8	3	2	1	3	793 745.15	3.78
9	3	3	2	1	1 883 330.18	4.14
$k_{1t}$	772 979.59	849 140.02	660 155.97	1 232 531.60		
$k_{2t}$	978 845.24	977 337.27	1 097 891.70	990 600.50		
$k_{3t}$	1 379 384.90	1 304 731.60	1 373 161.20	908 076.74		
$R_t$	606 404.50	455 591.59	713 005.28	324 454.95		
$k_{1r}$	2.93	3.22	3.06	3.36		
$k_{2r}$	3.66	3.41	3.57	3.17		
$k_{3r}$	3.57	3.53	2.99	3.35		
$R_r$	0.73	0.31	0.61	0.46		

### 2.2.2 表面粗糙度的数据处理

按照试验序号对加工完成的工件进行表面粗糙度的测量。用表面粗糙度仪 TR100 分别测量正方形零件 4 加工面的表面粗糙度,记录参数并取其平均值,如表 2 所示。

将试验能耗及粗糙度数据进行处理,求得各因素的水平 1、2、3 的加工能耗平均值  $k_{1t}$ 、 $k_{2t}$ 、 $k_{3t}$ ,极差  $R_t$  及表面粗糙度平均值  $k_{1r}$ 、 $k_{2r}$ 、 $k_{3r}$ ,极差  $R_r$ ,整理后如表 2 所示。

表 2 中,以  $k_{1t}$  为例,代表各因素的水平 1 所对应的能耗平均值,脉宽 A 中对应的水平 1 有试验号 1、2、3 三组,所对应的能耗值分别为 383 598.35、707 600.15、1 227 740.27 W,故其平均数  $k_{1t}$  为:772 979.59。

## 3 电参数对加工能耗及粗糙度影响分析

通过上述数据的处理分析可知,极差  $R_t$ 、 $R_r$  为同组数据间最大值与最小值的差距值。由表 2 可得出按极差大小排列出各因素对线切割能耗及表面粗糙度影响的主次关系。对加工能耗的影响由主到次依次为:跟踪 C、脉宽 A、脉间距 B、限速 D;对表面粗糙度的影响由主到次依次为:脉宽 A、跟踪 C、限速 D、脉间距 B。

理想的加工方式应为低加工能耗、低表面粗糙度方式。如图 4~7 所示,直观地显示了各因素对线切割能耗及表面粗糙度的影响趋势,从中可以看出试验控制因素(脉宽、脉间距、跟踪、限速)对线切割能耗及加工零件表面粗糙度的影响程度。

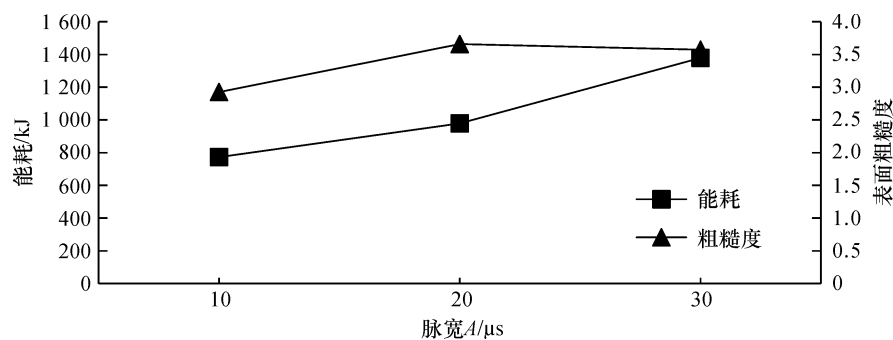


图4 脉宽与能耗、表面粗糙度的关系

Fig. 4 Relationship between pulse width and energy consumption, surface roughness

由图 4 可知,能耗与脉宽呈正相关,表面粗糙度随脉宽增大而先增大后减小。其物理机制为:当脉宽增加时,单位脉冲放电时间增加,能耗增大;当脉宽增加到阈值前时,单脉冲切割量大,粗糙度增大,脉宽增大超过阈值后,放电的连续性增大,粗糙度降低<sup>[13]</sup>。

由图 5 可知,能耗与脉间距呈正相关;表面粗糙度与脉间距呈正相关关系。其物理机制为:放电间距增加,材料的切除时间缩短,空载时间增大,能耗增大,粗糙度增大<sup>[14]</sup>。

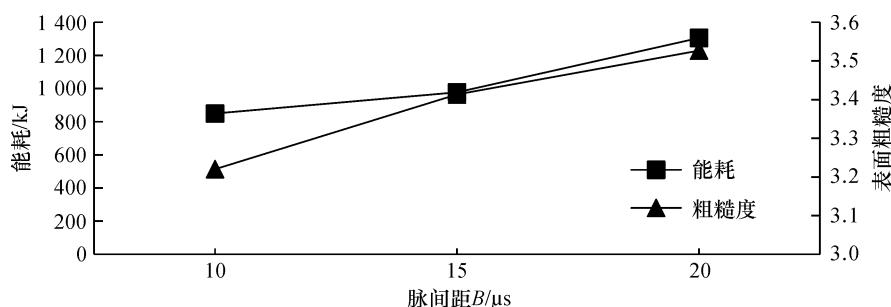


图 5 脉间距与能耗、表面粗糙度的关系

Fig. 5 Relationship between pulse spacing and energy consumption, surface roughness

由图 6 可知,能耗与跟踪呈正相关;表面粗糙度与跟踪呈负相关关系。其物理机制为:跟踪增加,走丝移动频率增加,能耗增大,粗糙度减小。

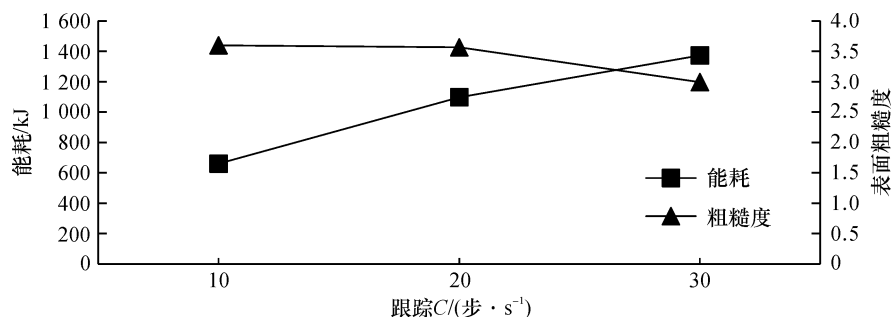


图 6 跟踪与能耗、表面粗糙度的关系

Fig. 6 Relationship between tracking and energy consumption and surface roughness

由图 7 可知,能耗与限速呈负相关;表面粗糙度随限速的增大先减小后增大。其物理机制为:若走丝速度增加,则切割时间减少,总能耗降低;速度在增加到一定程度前会增加放电的连续性,减小粗糙度,当增大超过阈值后会因速度过快导致放电切除不充分而增大粗糙度<sup>[15]</sup>。

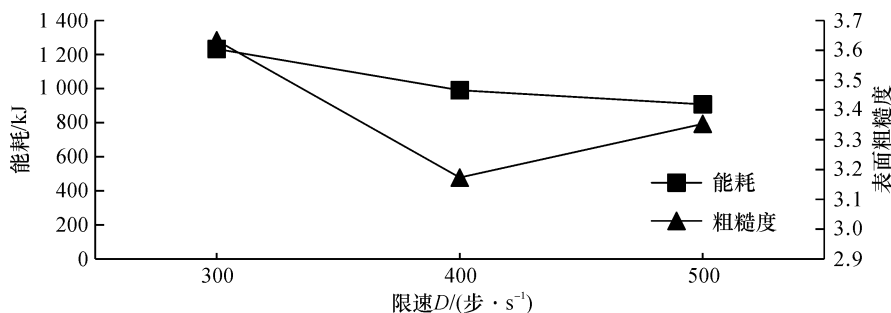


图 7 限速与能耗、表面粗糙度的关系

Fig. 7 Relationship between speed limit and energy consumption, surface roughness

## 4 结 论

为了获得低能耗和低表面粗糙度的电火花线切割参数,笔者针对电火花线切割电参数对加工能耗及粗糙度的影响开展了研究。以 DK7740D 电火花中走丝线切割数控机床为试验机床,分析电火花线切割参数对能耗和表面粗糙度的影响,得到了如下适用于大部分中走丝线切割机床的结论:

- 1) 能耗与脉宽呈正相关,与脉间距呈正相关,与跟踪呈正相关,与限速呈负相关。
- 2) 表面粗糙度随脉宽增大先增大后减小,与脉间距呈正相关,与跟踪呈负相关,随限速的增大而先减小后增大。
- 3) 4个电参数对能耗的影响程度由强到弱分别为跟踪、脉宽、脉间距、限速;对表面粗糙度的影响程度由强到弱分别为脉宽、跟踪、限速、脉间距。
- 4) 对5 mm厚45#钢热轧板的最佳电参数组合为:脉宽10  $\mu\text{s}$ 、脉间距10  $\mu\text{s}$ 、跟踪25步/s和限速400步/s。

#### 参考文献:

- [1] 朱宁,叶军,韩福柱,等.电火花线切割加工技术及其发展动向[J].电加工与模具,2010(B04):53.
- [2] 国务院.国务院关于印发《中国制造2025》的通知[EB/OL].(2015-05-19)[2017-06-18].[http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content\\_9784.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm).
- [3] DIETMAIR A, VERL A W, EBERSPAECHER P. Model-based energy consumption optimisation in manufacturing system and machine control[J]. International Journal of Manufacturing Research, 2011, 6(4):380.
- [4] DUFLOU J R, SUTHERLAND J W, DORNFELD D, et al. Towards energy and resource efficient manufacturing: a processes and systems approach[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2012, 61(2):587.
- [5] CAO H, LI H. Simulation-based approach to modeling the carbon emissions dynamic characteristics of manufacturing system considering disturbances[J]. Journal of Cleaner Production, 2014(64):572.
- [6] 王玉魁,宋博岩,王振龙,等.节能式电火花加工脉冲电源的系统设计[J].中国机械工程,2006,17(17):1784.
- [7] HO K H, NEWMAN S T. State of the art electrical discharge machining (EDM)[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(13):1287.
- [8] 杨蕾,蔡安江.电火花线切割加工参数对加工速度和表面粗糙度影响的研究[J].机床与液压,2011,39(15):45.
- [9] 蒋军,韩福柱.放电电流对电火花线切割精加工表面粗糙度的影响规律研究[J].电加工与模具,2006(1):9.
- [10] 王斌,王会霞.线切割加工中电参数对工件表面粗糙度的影响[J].河北工业科技,2007,24(2):70.
- [11] 马英,杨斌武,屈双军,等.电火花线切割加工工艺的特点[J].工具技术,2007,41(11):100.
- [12] 郑军,王黎航,凌玮.一种能耗检测装置:CN205786843U[P].2016-12-07.
- [13] 王秋莲,黄文帝,陈真,等.数控机床能效在线监测方法及监测系统[J].现代制造业,2015(1):39.
- [14] 胡韶华.现代数控机床多源能耗特性研究[D].重庆:重庆大学,2012.
- [15] 单岩.数控电火花加工[M].北京:机械工业出版社,2009.

(上接第374页)

- [12] 袁丹丹,陈晓燕,侯丽君,等.利用渥堆发酵制备银杏叶茶的研究[J].食品与生物技术学报,2017,36(7):750.
- [13] 董玉中,潘苏华,张丽. HPLC法比较与不同比例梨汁配伍前后银杏酸的含量变化[J].黑龙江医药,2009,22(5):601.
- [14] 程晓亮,杨亚妮,倪力军,等.两种螯合树脂用于银杏叶提取液脱重金属的研究[J].中药新药与临床药理,2008,19(6):492.
- [15] 姚鑫,周桂生,唐于平,等.不同产地及株龄果用银杏叶中总银杏酸含量的比较[J].植物资源与环境学报,2012,21(4):108.