

# 气中电火花线切割加工技术研究\*

王 彤 陈玉全

(哈尔滨理工大学机械动力学院 哈尔滨 150080)

国枝正典

(日本东京农工大学)

摘要: 传统的电火花加工, 一般都在液体介质中进行, 如煤油等。虽然液体介质被认为是平稳和高效加工所必需的, 但是它可以造成环境污染。在分析压缩气体条件下进行电火花加工机理的基础上, 提出一种气中电火花线切割加工的新工艺。其运动着的电极, 甚至在大气中也可以从加工间隙中排除加工屑; 而且将其用于精加工(多次切割) 时, 可获得沿工件厚度方向上比液中加工时更高的直线度。低速走丝试验结果证明了上述的优点。高速走丝气中电火花线切割加工的初步试验结果表明, 气中电火花线切割加工具有广阔的应用前景。

关键词: 气中电火花线切割加工 多次切割(精加工) 直线度

中图分类号: TG661

## 0 前言

电火花加工是用高密度能量的脉冲放电来去除材料的加工方法, 它适用于机械加工方法难以加工的材料或具有复杂形状的工件, 因而获得了广泛的应用。但在近半个世纪的发展过程中, 却一直存在着这样一种观念: 电火花加工必须在煤油或水等加工液中进行。实践中发现, 使用加工液时也会产生以下方面的问题: 使用煤油或含有添加剂的工作液加工时, 高温放电通道使加工液发生热裂和化学反应, 易使焦油等附着在加工面上, 增加了加工的不稳定性, 导致降低加工速度及精度<sup>[1]</sup>。用煤油加工钢时, 加工面上将形成含有微裂纹等缺陷的白层<sup>[2]</sup>。使用去离子水进行电火花线切割时, 会发生电解腐蚀, 在工件表面上产生微空洞<sup>[3]</sup>。使用油加工液, 还存在着火灾隐患, 难以实现无人看管加工。使用煤油或有添加剂的水工作液加工时会产生有害气体<sup>[4]</sup>。此外, 也存在着废液的处理问题等。

针对上述存在的问题, 东京农工大学国枝正典教授所领导的国枝研究室, 于 1995 年前后率先开展了气中(干式)电火花型腔加工研究。气中电火花加工, 是指在放电加工的过程中, 用高速气流替代传统的加工液, 实现加工间隙内加工屑的排出及起冷却作用的一种新型加工方法<sup>[5,6]</sup>。继气中电火花型腔加工研究, 国枝正典和王彤等人, 又进行

了低速走丝气中电火花线切割的开发研究工作。在气中电火花加工前期研究的基础上, 并结合首次开展的高速走丝气中电火花线切割试验研究的结果, 探讨可应用于生产实际的一种新的气中电火花线切割多次切割工艺。

## 1 气中电火花加工特性分析

已进行的气中电火花加工研究是采用回转式薄壁管状工具电极, 管中输入压缩气体, 实现平动式型腔加工<sup>[5]</sup>。根据该研究及其他基础研究结果, 认为气中电火花加工具有以下的基本特征。

(1) 气中型腔加工时, 由于放电过程本身较难实现加工屑的排出等功能, 而且所排出的熔融金属冷却较慢, 容易附着在工件表面上<sup>[7]</sup>, 必须外加压缩空气协助, 完成排屑、冷却及消电离的功能。

(2) 气中加工时, 由于飞溅到工具表面的部分工件材料起着电极保护作用, 其工具电极的相对损耗较低( $<1\%$ ), 且与脉宽无关<sup>[5]</sup>。

(3) 气中加工时, 放电间隙内不存在液中加工时的加工屑漂浮现象, 绝缘性能较强, 在其他条件相同时, 放电间隙比液中加工时小<sup>[8]</sup>。

(4) 液体的惯性和粘度远远大于气体的, 在放电过程中压缩放电通道的能力强, 液中放电时会产生比气中较大的爆炸力<sup>[9]</sup>。但气中加工时的放电通道截面较大, 能量密度较低, 产生的放电痕直径大而深度较小, 会降低表面粗糙度。从后两个特征上看, 气中电火花加工有望在精加工中获得应用。

(5) 在型腔加工中, 气中加工速度较液中加工

\* 国家自然科学基金(50105003)、黑龙江省博士后研究人员科研启动基金和黑龙江省教育厅科学技术研究(10511113)资助项目。20020822 收到初稿, 20030120 收到修改稿

时低。除上述加工屑排出较难的原因外,更主要的是由于放电间隙较小,而现有电火花加工机床主轴头的惯性较大、响应速度低,难以在较小间隙范围内进行快速调整,使短路率增加<sup>[10]</sup>。

## 2 气中电火花线切割多次切割的可行性和必要性分析

从气中加工的角度上看,电火花线切割加工的最突出的特点是具有以一定速度运动着的电极丝。另外电极丝柔性大,容易产生挠曲和振动。电极丝的运动可以将工作介质带入放电区,将电蚀产物和部分热量从放电区中带出。而且在一定的范围内,其走丝速度决定了上述能力的发挥程度。实践表明,不采用压缩气体,仅在大气中也有可能实现低速走丝电火花线切割的粗加工,而在多次切割中能获得更理想的加工效果<sup>[11,12]</sup>。这说明,在一定程度上,电极丝的运动比压缩气体有更大的电蚀产物排除效果,提高走丝速度效果会更明显。

多次切割是国外采用的一种低速走丝电火花线切割精加工工艺,用以提高加工精度及表面粗糙度;但是在液中加工时,沿工件厚度方向却较难获得更高的直线度精度。这是因为电极丝在导向器间,相当于一个低刚度弦结构,加工时在静电力、放电爆炸力和电磁力的作用下,在电极丝受静电力产生的静变形基础上,叠加以由后两个动态力激起的振动。由于放电间隙较小,静变形的最大挠度大于振动的振幅。故在一般情况下,工件沿厚度方向多产生中凹形。因此,降低静电力值是提高加工直线度的关键<sup>[13]</sup>。静电力计算理论式为

$$F_s = \frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon_s U_0^2}{r \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1} \times \ln^2 \left[ \frac{h}{r} + \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1} \right]}$$

式中  $F_s$ ——电极丝单位长度的静电力

$r$ ——电极丝半径

$h=r+D_r$

$D_r$ ——加工间隙

$U_0$ ——外加电压

$\varepsilon_0$ ——真空介电系数

$\varepsilon_s$ ——相对介电系数

理论上水的相对介电系数为 82,加工时因含有气泡,实际上降至 20,而空气的相对介电系数约为 1。在其他条件相同时,气中加工时的静电力值仅为液中的  $1/20$ <sup>[13]</sup>。考虑到气中的放电爆炸力

也较小,故气中加工时可以获得更高的直线度精度。

我国生产的传统高速走丝电火花线切割机床,由于某些结构、运动精度和控制方面所存在的问题,采用多次切割方法的效果并不太理想。我国的电加工界在谈到高速走丝电火花线切割机床的发展策略时认为,为提高其加工品质,必须发展多次切割工艺<sup>[14]</sup>。

## 3 气中电火花线切割的试验研究

### 3.1 低速走丝精加工

低速走丝精加工是国外提高加工精度和表面粗糙度的工艺方法,称为“二次切割”或“多次切割”。在去离子水中加工时,为了获得工件厚度方向的高直线度精度,须进行更多次的加工。考虑到气中电火花加工的特点,有必要通过试验探讨气中电火花线切割的精加工特性,同时也为我国高速走丝电火花线切割进行气中精加工提供借鉴。

#### 3.1.1 试验条件及方法

在低速走丝精加工试验中,工件材料采用了模具钢 SKD11 和硬质合金 D20 两种材料,其毛坯表面均经过磨削精加工。试验设备为 Sodick 公司生产的 BF280L 型低速走丝电火花线切割机床。精加工方式如图 1 所示。当加工介质为大气时,关闭机床的原供液系统;当加工介质为压缩气体时,将供气源直接接入上下喷嘴。对比试验的参数见表 1。

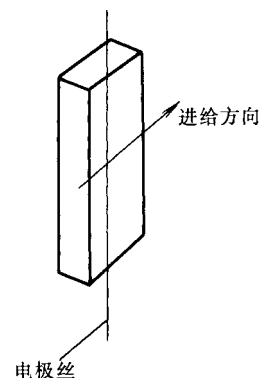


图 1 线切割精加工示意图

表 1 线切割精加工参数

工件材料	D20	SKD11
脉冲宽度 $t_f/\mu\text{s}$		0.5
脉冲间隔 $t_o/\mu\text{s}$	10.0	7.0
峰值电流 $I_p/\text{A}$	9.0	10.5
工件厚度 $\delta/\text{mm}$		24
切削深度 $a_p/\mu\text{m}$		5

(续)

电 极 丝	材 料	黄铜	
	直径 $d/\text{mm}$	0.2	
丝速 $v_s/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	250	58.0	
张紧力 $T_w/\text{N}$	8.0		
工作液流 $q_r/\text{L}$	2.0		
压缩气体压力 $p/\text{MPa}$	0.2		

### 3.1.2 试验结果与分析

在电火花线切割精加工中,采用液体或气体不同加工介质时,会获得明显不同的直线度值。图 2 和图 3 分别为模具钢 SKD11 和硬质合金 D20 的直线度试验结果(沿工件厚度方向测量)。图 4 为硬质合金的加工表面轮廓曲线。结果指出,大气中加工时的直线度大大优于液中加工,这是因为大气中加工时的静电力值仅为液中的 1/20,而且放电爆炸力也较小。另外,图 3 表明在压缩氧气和压缩空气中加工时可获得相近的直线度,而且它们均优于在大气中加工所获得的直线度,其原因在于采用压缩气体时,较在大气中进一步改善了排屑条件。

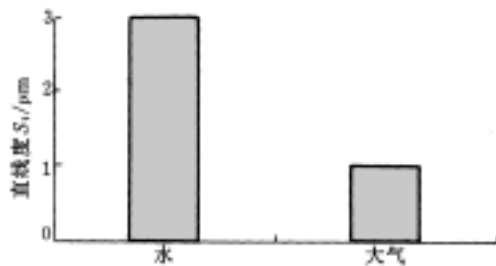


图 2 模具钢 SKD11 的直线度试验结果

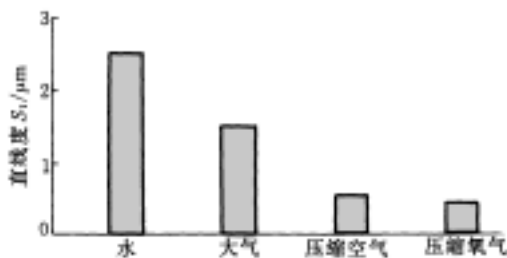


图 3 硬质合金 D20 直线度试验结果

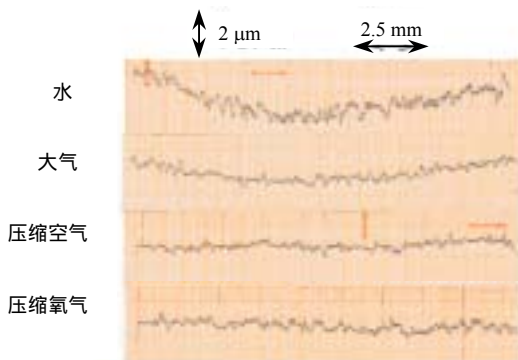


图 4 硬质合金 D20 加工表面轮廓曲线

模具钢 SKD11 的粗糙度试验结果如图 5 所示,可见大气中加工时的粗糙度值低于液中加工。这是因为气中加工的放电通道宽加工能量较分散,而且放电爆炸力较小的缘故。

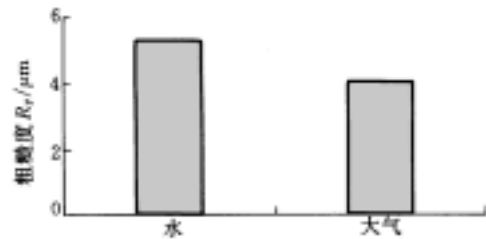


图 5 模具钢 SKD11 的粗糙度试验结果

电火花线切割与型腔加工相比,其特点是在大气中完成精加工,可以不采用压缩空气。其原因在于,以一定速度运动着的电极有助于排除加工屑。在大气中进行的模具钢 SKD11 的加工速度试验中(见图 6),由于电极丝走丝速度取得较低(58 mm/s),而且其加工间隙又小,不易排屑,加工稳定性差,其短路率高于液中加工,所以其加工速度比液中加工时低。

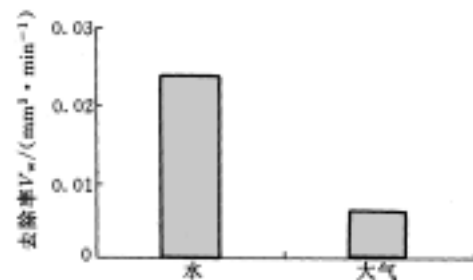


图 6 模具钢 SKD11 的加工速度试验结果

此外,为了探讨不同加工条件对放电间隙的影响,在硬质合金加工试验时进行了放电间隙测量。结果表明水、大气和压缩空气中的放电间隙分别约为 14 μm、7 μm 和 3 μm。气中加工较液中加工时的加工间隙小,是气中放电加工的共性,因为它不存在液中的加工屑漂浮现象。加工时采用压缩空气,有利于排除加工屑,使加工更稳定,得以保持更小的放电间隙。

### 3.2 高速走丝精加工

虽然目前我国的高速走丝电火花线切割机床尚难以采用多次切割工艺进行精加工,但是由于它具有更高的走丝速度,有利于实现在大气中进行电火花加工。开展气中高速走丝电火花线切割精加工试验研究,可能为解决这个难题提供一种新途径。此外,通过此试验也可探明走丝速度对气中电火花线切割加工性能的影响程度。试验包括两个部分,其一是采用较大的相同切深进行精加工,探讨在不同

加工条件下对加工粗糙度及加工速度的影响规律。第二部分是在同一个试件上进行了多次切割精加工试验，观察在高速走丝条件下实现多次切割精加工的效果。

两试验均采用苏州沙迪克三光机电有限公司生产的 DK7740B 型高速走丝电火花线切割机床，开路电压为 100 V，电极丝直径为 0.18 mm 的钼丝，走丝速度为 10.3 m/s，工件材料均为 Cr12MoV。

在大气与乳化液介质的精加工对比试验中，工件厚度为 34 mm，其切深全部取为 100 μm。有关加工速度、加工表面粗糙度试验结果和其余的试验条件如表 2 所示。表中的高速走丝气中精加工结果，显示出提高丝速的突出加工特点。首先，在大气条件下，高速走丝比低速走丝极大地提高了加工速度，而且加工状况稳定。从气中加工效率上看，提高丝速比采用压缩空气的效果要好，因为高速走丝更有利于电蚀产物和热量的排除。另一个意料之外的效果是，高速走丝时，气中加工比液中加工时的加工速度普遍要高。经过分析认为，粗加工时电极丝位于加工缝隙之间，而精加工时电极丝为单侧接近工件，前者比后者对电极丝具有更强的横向运动阻尼作用。液中精加工时，高速运动着的电极丝和较大的电极与工件间作用力，可激发电极丝产生较强的振动，提高了短路率，降低了加工速度。气中精加工时，电极与工件间作用力十分小，可以获得更高的加工速度。从两种介质条件下所获得的表面粗糙度来看，较为接近。这说明所取的切深偏大，而且高速走丝产生的振动对粗糙度都有影响。

表 2 大气与乳化液介质的精加工对比试验

电 参 数			乳 化 液		大 气	
脉宽 $t_f/\mu\text{s}$	脉间 $t_0/\mu\text{s}$	短路电 流 $I_s/\text{A}$	加工速度 $v_w/$ ( $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	加工速度 $v_w/$ ( $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
		8	0.8	1.90	2.8	1.54
2	20	12	1.2	1.57	2.9	1.65
		16	2.1	1.23	6.0	1.49
		8	1.0	1.71	5.0	1.72
8	80	12	2.1	1.85	5.1	1.86
		16	3.1	2.25	7.3	2.06

为了进一步探讨采用高速走丝电火花线切割方式实现气中多次切割的可行性，在高速走丝电火花线切割机床上进行了多次切割加工试验，工件厚度为 40 mm。首先通过液中粗加工切下试件，在粗加工表面上进行气中多次切割精加工(共三次)，其试验参数及结果分别如表 3 与图 7 所示。随着精加工参数的减小，其表面粗糙度也逐步降低，说明该加工方法是可行的。

表 3 多次切割试验参数

	液 中		气 中	
	一次	二次	三次	四次
	粗加工	精加工	精加工	精加工
脉宽 $t_f/\mu\text{s}$	16	8	4	2
脉间 $t_0/\mu\text{s}$	48	80	40	20
短路电流 $I_s/\text{A}$	16	16	16	8
切深 $a_p/\mu\text{m}$	—	100	50	10

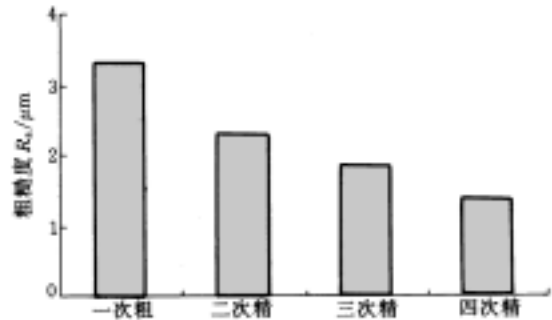


图 7 多次切割效果对比图

气中电火花线切割加工技术，由于它在加工原理上与液中加工时存在着一定的差异，因此在研究过程中将涉及到其电参数及电源、非电参数(特别是走丝速度及进给速度)、被加工工件条件和控制系统等因素对加工质量和加工速度的影响问题。考虑到加工中尚存在着一些随机因素干扰，而且目前对其加工微观过程了解得还不够深入，因此除了应进行必要的理论分析外，今后还须开展大量的试验研究工作。

### 4 结论

- (1) 气中电火花加工具有放电间隙窄和工件与电极间作用力小的特点，为气中电火花线切割进行精加工(多次切割)创造了条件，有利于提高其加工质量，特别是加工的直线度。
- (2) 气中电火花线切割时，运动着的电极丝，在一定的条件下，其电蚀产物的排除效果超过压缩气体的作用。若在大气中进行电火花线切割精加工，电极丝的走丝速度应选择适当，避免速度过高所带来的负面影响。
- (3) 试验时发现，大气中进行高速走丝电火花线切割精加工钢材时，普遍较用乳化液加工时的加工速度高，而且十分明显地超过低速走丝电火花线切割精加工时的加工速度。结合高速走丝电火花线切割多次切割试验的结果可以认为，有望在未来的高速走丝电火花线切割机床上，将气中多次切割工艺推向实际应用。

## 参 考 文 献

- 1 高桥信之, 中山实. 放电加工油について. 见: 第 1 回电气加工学会全国大会讲演论文集, 1991: 93~96
- 2 六崎贤亮, 铃木正敏, 河合荣一郎. 铁钢材料の放电加工面における变质层. 日本金属学会志, 1963, 27(6): 283~287
- 3 增井清德, 曾根匠. ワイヤ放电加工面の电解腐蚀. 精密工学会志, 1988, 54(6): 1168~1172
- 4 上出谕吉ら. 放电加工における加工液と発生ガス. 见: 第 3 回电气加工学会全国大会讲演论文集, 1993: 67~70
- 5 Kunieda M, Yoshida M. Electrical discharge machining in gas. *Annals of the CIRP*, 1997, 46(1): 143
- 6 国枝正典, 吉田政弘. 气中放电加工. 精密工学会志, 1998, 64(12): 1735~1740
- 7 Masahiro Yoshida, Masanori Kunieda. Study on the distribution of scattered debris generated by a single pulse discharge in EDM process. *IJEM*, 1998(3): 39~44
- 8 Kunieda M, Mori M. Relation between debris concentration and discharge gap length in EDM process. In: *Proceedings of Asian Electrical Machining Symposium' 95*, 1995
- 9 安达芳朗, 吉田政弘, 国枝正典. 单发放电における気泡の挙動と加工反力. 电气加工学会志, 1997, 31(67): 23~27
- 10 Yoshida M, Kunieda M, Kaneko Y. Improvement of material removal rate of dry EDM using piezoelectric actuator coupled with servo-feed mechanism. In: *Proceedings of 14th CAPE*, 1998: 283~287
- 11 Tong Wang, Masanori Kunieda. Study on dry WEDMed surface. In: *Proceedings of International Symposium for Electromachining (Bilbao, Spain)*, 2001: 505~512
- 12 Tong Wang, Masanori Kunieda. Study on dry WEDMed surface layer of cold tool steel SKD11. *International Journal of Electrical Machining*, 2002(7): 3~4
- 13 小原治树, 石津稔之, 河合保, 等. 放电加工の加工シミュレーション (第三报). 电气加工学会志, 2000, 34(75): 30~37
- 14 刘正坝. 我国特种加工技术的回顾与展望. 电加工, 1999(5): 6~11

## STUDY ON WIRE-CUT ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING IN GAS

Wang Tong    Chen Yuquan

(Harbin University of Science &amp; Technology)

Kunieda M

(Tokyo University of Agriculture &amp; Engineering, Japan)

**Abstract:** Conventional electrical discharge machining(EDM) is generally carried out in dielectric liquid such as kerosene-based oil. Although liquid medium is regarded as indispensable for the stability and efficiency of the process, but it may cause certain environmental pollution. Based on analyzing the machining mechanism of EDM in compressed gas, a new wire-cut EDM(WEDM) in gas is presented. For WEDM in gas, its traveling tool electrode may conduce to removing debris from the working gap even in atmosphere and by utilizing this process as finish-cut, obtained straightness along the work's thickness direction is significantly better than that machined in water. Experimental results of low speed WEDM have proved above-mentioned features and those of high speed WEDM preliminarily show that WEDM in gas has broad prospects to its application.

**Key words:** WEDM in gas    Multiple-cut (finish-cut)

Straightness

作者简介: 王彤, 女, 1967 年出生, 博士, 副教授。主要从事特种加工技术的研究。