

基于往复渐进运动控制的硅材料电火花线切割

罗福源 张 琪

(南京航空航天大学机电学院,南京,210016)

摘要:硅材料的特殊电学特性使得传统的电火花线切割伺服控制系统所采用的放电状态检测方法失效。为此提出了一种采用“进给—后退—再进给”运动方式的往复渐进自适应控制方法。阐述了往复渐进自适应进给原理与运动控制流程,分析了通过往复渐进运动能够弱化换向纹的机理,并结合在线检测技术、预测控制及模糊控制理论实现了进给速度以及放电电流阈值等重要运动控制参数的自适应调整。在自主开发的伺服控制系统上进行了硅材料电火花线切割实验,结果表明所提出的新方法切实可行,具有较强的自适应控制能力与明显的弱化换向纹的效果。

关键词:电火花线切割;硅材料;放电间隙检测;往复渐进运动;自适应模糊控制

中图分类号:TG661 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2013)06-0830-07

Wire-Cut Electrical Discharge Machining of Silicon Materials Based on Reciprocating Progressive Motion Control

Luo Fuyuan, Zhang Qi

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The special electrical properties of silicon material make the traditional method used in servo control system for wire-cut electrical discharge machining (WEDM) fail to detect discharge status. Therefore, a reciprocating progressive adaptive control method is proposed by means of back and forth feed motion. The principle of reciprocating progressive adaptive feed and the procedure of motion control are presented. The mechanism that why communicating stripes can be reduced by reciprocating progressive movement is analyzed. Moreover, the adaptive adjustment of key parameters such as feed rate and threshold of discharge current is implemented by adopting on-line measurement technology as well as predictive control and fuzzy control theories. Silicon material cutting experiment is done with the self-developed servo control system for WEDM. The experimental result shows that the proposed new method is really feasible, and it has great adaptive control ability and is good at reducing communicating stripes.

Key words: wire-cut electrical discharge machining(WEDM); silicon material; discharge gap detecting; reciprocating progressive motion control; adaptive fuzzy control

硅是太阳能光伏产业和微电子器件制造领域使用最为广泛的原材料之一。将硅锭切割成硅片是一项艰巨而繁重的生产工序。目前常用的切割方法有内圆切割、外圆切割以及线锯等^[1]。由于这

基金项目:国家自然科学基金(51205200)资助项目;江苏省自然科学基金(BK2012388)资助项目;中央高校基本科研业务费(NS2012098)资助项目。

收稿日期:2013-08-15;**修订日期:**2013-10-15

通信作者:罗福源,男,副教授,1977年出生,E-mail:fuyuanluo@126.com。

些方法存在机械应力、环境污染等缺点,国内外一些专家学者开始尝试采用电火花线切割技术(Wire-cut electrical discharge machining, WEDM)来进行硅片切割,并取得了初步的研究成果^[2-3]。例如,美国犹他州立大学的 Rakwal 和 Bamberg 利用 WEDM 对与硅电学特性类似的单晶锗和掺杂镓的锗进行了切片研究,用直径为 75, 100 μm 的钼丝切出了直径 66 mm、厚度 350 μm 的薄片^[4]。日本的 Takino 和 Ichinohe 等采用 WEDM 工艺对抛光的单晶硅进行加工,发现使用油作为工作液比使用水具有更好的表面质量^[5];台湾国立大学的研究人员通过研究了一种增大进电接触面积的方法对硅锭进行慢走丝电火花线切割^[6]。南京航空航天大学的刘志东、汪炜、田宗军等在分析不同电阻率单晶硅的加工性能差异的基础上,研究了进电方式对高阻半导体硅放电加工的影响,并创建了一种随动进电的电火花线切割方案^[7]。此外,其还对太阳能硅片电火花电解复合切割制绒机理进行了分析研究,充分证实了高速往复走丝电火花线切割在硅材料加工方面的可行性和优越性。

然而,由于硅是一种半导体材料,具有与金属材料迥异的电学特性,如进电时存在较大的接触垫垒及较高的电阻率^[8]等,传统用于切割金属的电火花线切割机床并不能直接用于硅材料加工。如果直接应用传统的伺服控制系统进行硅片切割,将出现欠进给或者电极丝弯曲甚至断丝现象。这是因为,传统伺服控制系统的正确运行是建立在对电火花加工过程的放电状态的准确检测的基础上的。在加工金属时,空载、偏空载、正常放电、电弧放电和短路状态所对应的间隙电压和电流具有非常明显的放电脉冲特征^[9],如图 1 所示,传统伺服控制系统通过这些特征的识别就能方便地确定放电状态进而调整进给速度。但是,对于硅材料加工,正常放电状态和短路状态的间隙电压和电流相差不大,即使电极丝已经与硅材料紧密接触,极间电压幅值也不会立即降至零,此时仍然可以正常放电加

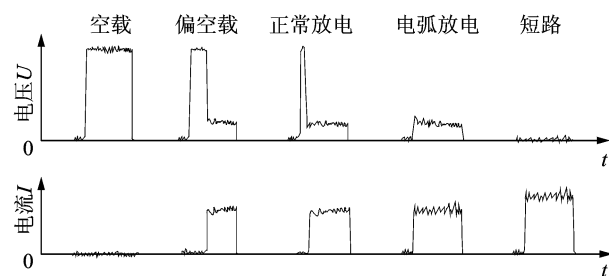


图 1 切割金属时的各种放电状态

工。由于难以区分正常放电状态和短路状态,传统的伺服控制系统完全失效,无法保障切割的顺利进行。

因此,必须针对硅材料的特殊电特性制订新的伺服控制方案。文中提出了一种基于往复渐进运动的硅材料电火花线切割自适应控制方法。这种方法通过“进给—回退—再进给”的特殊运动方式回避了放电间隙大小难以检测以及正常放电状态与短路状态难以区分的难题,使得硅材料放电加工得到持续顺利地进行,并且具有弱化高速往复走丝电火花线切割机床的运丝系统反复换向所导致的换向纹的效果,回退运动还有利于切屑的排除、被加工表面的洗涤以及电极丝的冷却,从而提高加工质量和加工效率。

1 往复渐进自适应运动控制技术原理

1.1 往复渐进自适应进给原理

注意到在对硅材料进行电火花线切割时,虽然正常放电状态与短路状态的间隙电压和电流没有明显的区别,但空载状态与正常放电状态仍然存在显著的差异。此外,由于短路状态是在比正常放电状态更小的间隙内出现,从时空关系分析可知,短路状态总是发生在正常放电状态之后。基于此,可以让电极丝从远离工件的空载状态逐渐靠近工件,在这过程中,随着电极丝与工件之间的距离逐渐减小,必然首先获得一个满足电火花正常放电的合适间隙,并且由于极间电压和电流发生了变化,这个正常放电状态能够被控制系统所识别。接下来,如果继续向前进给,就会到达应该力求避免但又难以检测的短路状态。因此,在检测到进入正常放电状态之后,控制系统停止进给,且在稍作停留之后回退到一个变成空载状态的位置,然后再向前进给,如此按照“进给—回退—再进给”的方式。在此过程中,虽然电极丝相对于工件不断往复运动,但由于放电状态产生的电火花对工件的蚀除作用,因此从宏观来看,放电中心位置一点点地在向前推进,这就是往复渐进运动的加工原理,如图 2 所示。显

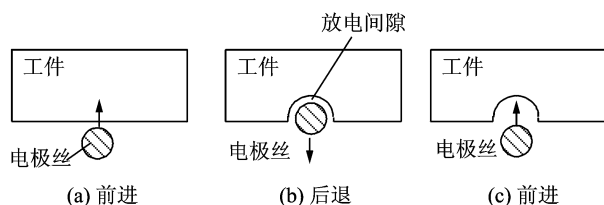


图 2 往复渐进自适应进给原理

然,这种进给运动方式避免了短路状态的发生,无需检测短路状态,亦无需检测放电间隙的大小就能保证加工顺利进行。这种进给加工方法与工件的当前厚度、蚀除率、材料特性无关,能够实现加工间隙的自动跟踪和保持,因此是一种自适应控制方法。由于回退过程中工件与电极丝之间的间隙变大,工作液可以顺畅地流进切缝内平时难以进入的狭窄部位,加快工件蚀除产物的清除、被加工表面的洗涤以及电极丝的冷却,因此这种方法还有利于加工质量和加工效率的提高。

1.2 往复渐进运动控制流程

根据上述往复渐进自适应进给加工原理,正常放电状态的准确识别是一个关键问题。如果在空载状态向前进给过程中,检测到一点点电火花极弱的电流就立即回退,那么由于电火花放电加工作用过于微弱,将严重影响加工效率;如果在检测到极强的电流之后才回退,那么系统可能已经进入短路甚至电极丝已经发生弯曲。因此,在控制过程中,需要确定一个合适的电流阈值,并以此作为是否进入正常放电状态的判断依据。往复渐进控制流程如图3所示:初始时以速度 v_s 向前进给,一边进给一边不停地检测间隙电流。若当前电流未到达设定的正常放电电流阈值 I_m ,说明无短路危险,继续进给;否则记录当前位置后快速回退,一直回退到当前间隙电流平均值为零为止,然后迅速返回原回退点,再以速度 v_s 向前进给。在这里,通过快速回退并快速返回原回退位置缩短非放电加工时间,避免往复运动导致加工效率降低。

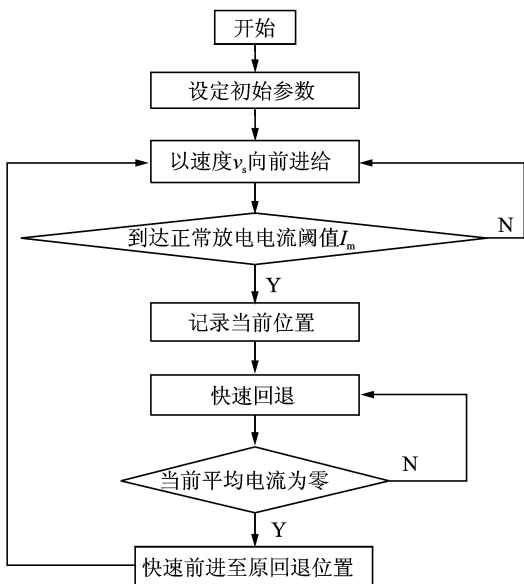


图3 往复渐进控制流程图

1.3 往复渐进运动弱化换向机理

在高速往复走丝电火花线切割机床中,造成工件表面产生换向条纹的原因主要有3种类型^[10]:(1) 走丝系统机械精度和稳定性差,导致加工区域电极丝换向后,电极丝在空间位置上发生变化,从而在工件表面产生的机械纹路;(2) 具有一定电导率的工作液在放电加工的同时对切割表面产生电解作用,加上工作液在切缝内冷却的不均匀性,导致在电极丝的入口、出口产生不同明暗程度的电解条纹;(3) 工件表面电极丝出口处因电弧烧伤形成的黑白交叉条纹。归结起来,正向和反向走丝时的工况不一致是产生换向条纹的根本原因。如图4所示,电极丝在工件上的 a 区域正向运动,在 b 区域反向运动。两种情况下,电极丝的入口和出口位置正好相反,电极丝的受力情况也会发生变化,根据前面所述3种原因,这时区域 a 和区域 b 的加工表面必然会产生差异,从而形成明暗相间甚至凹凸起伏的周期性纹理。

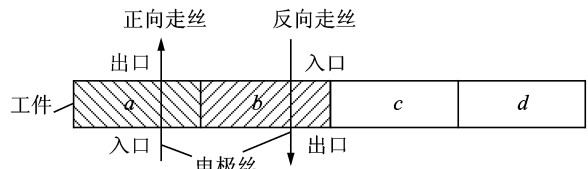


图4 换向纹产生原因示意图

换向纹的产生给后续的精加工造成了困难,影响了加工质量,是有害的,但依照传统的进给方法难以克服换向纹问题。而运用往复渐进的运动方式,则能够弱化换向纹,其机理如图5所示:在电极丝正向走丝状态从 P_1 点开始切割工件,切割到 P_2 点时,由于采用了往复渐进运动方式,电极丝在未换向之前就已回退,等再次向前运动到 P_2 点继续切割时,电极丝已变为反向走丝。这个过程中,不难观察到: P_1 、 P_2 两点之间的距离远小于传统方法加工时电极丝一次单向走丝所对应的切割距离(亦即换向纹宽度)。此外,从 P_1 点到 P_2 点既有正向切割又有反向切割,依此类推到 P_3 点相当于在短行程范围内实施了多次切割。这样,电极丝正向走丝和反向走丝所产生的不同形貌特征都被细腻而均匀地叠加到工件被加工表面上,不再有明显的差异。另外,回退运动加强了工件切缝内冷却的均匀性及工作液的洗涤能力,弱化了电解条纹,避免了电弧烧伤。因此,往复渐进运动控制方式能够十分有效地弱化换向纹。

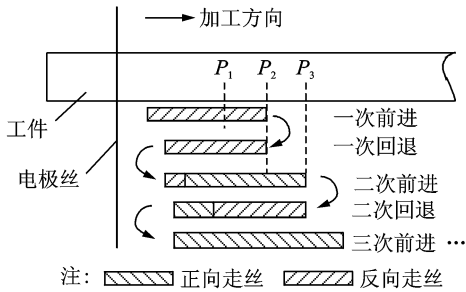


图 5 往复渐进运动弱化换向纹的机理分析

2 运动控制参数的自适应调整

2.1 进给速度自适应调整

在往复渐进运动控制流程中, v_s 是一个重要的控制参数。从伺服跟踪的角度来看, 若 v_s 定得太大, 将会导致正常放电时间过短, 并可能造成过跟踪; 反之, 若 v_s 定得太小, 将会导致欠跟踪, 也会降低加工效率。因此, v_s 的值应该接近实际蚀除速度。由于加工工况复杂, 影响因素众多, 实际蚀除速度会不断产生变化, 这就需要控制系统通过在线检测的手段来实时求取。若利用光栅尺测得每个往复运动过程中的回退点位置 $P_1, P_2, P_3 \dots$ 及其对应的回退时刻 $t_1, t_2, t_3 \dots$, 则每次往复运动过程中瞬时蚀除速度分别为

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{|P_2 - P_1|}{t_2 - t_1} \\ v_2 &= \frac{|P_3 - P_2|}{t_3 - t_2} \\ &\vdots \\ v_i &= \frac{|P_{i+1} - P_i|}{t_{i+1} - t_i} \end{aligned} \quad (1)$$

考虑到 v_s 是用于指导下一轮的进给运动, 最佳的 v_s 应该是根据蚀除速度的一系列历史测量值预测得到的未来蚀除速度值。为缩短计算时间, 提高系统实时响应性能, 这里采用一阶差分方程对未来速度进行预测

$$v_s = v_i + (v_i - v_{i-1}) \quad (2)$$

2.2 放电电流阈值自适应模糊调整

在往复渐进运动控制流程中, 正常放电电流阈值 I_m 是最为重要的控制参数。该阈值的大小直接决定了往复渐进运动的回退发生时刻。如果该值设置得过大, 将造成回退不及时, 引发短路甚至弯丝、断丝; 反之, 如果该值设置得过小, 将造成正常放电时间过短, 影响加工效率。由于电火花放电电流的非线性, 该参数的最优值随着加工条件的变化

而动态变化, 很难通过建立精确的数学模型来预先获取。考虑到模糊控制理论在非线性控制方面的优势, 这里通过模糊控制算法来动态调整 I_m 的值, 使之自动适应加工工况, 实现高效加工。

图 6 所示为设计的自适应模糊控制器的结构框图。图中 E 和 EC 为模糊控制器的输入量, 其中 E 为给定一段时间内的蚀除长度, EC 为实时检测得到的平均放电电流。之所以选取固定时间内的蚀除长度而不是前述的瞬时速度的原因是长度检测较为可靠, 而速度计算过程中由于计时时间短、精度低可能导致剧烈的数据波动, 危及模糊控制器的工作稳定性。同理, 考虑到电流检测误差与噪声干扰可能影响控制器的稳定性, 在把原始电流数据送入控制器之前需对其进行数字滤波处理。本文采用防脉冲干扰复合滤波法对测量数据进行数字滤波, 这种方法不仅可以去掉脉冲干扰, 还可以对电流采样值进行平滑处理。对于每个电流检测点, 运用过采样手段每次采集 5 个数据, 经排序后去掉干扰最强的最大值和最小值, 然后根据下式计算平均放电电流

$$I = \frac{i_2 + i_3 + i_4}{3} \quad (3)$$

式中: i_2, i_3, i_4 为满足下列条件的 3 个电流值 $\min(i_n) \leq i_j \leq \max(i_n) \quad 1 \leq n \leq 5, 2 \leq j \leq 4$ (4)

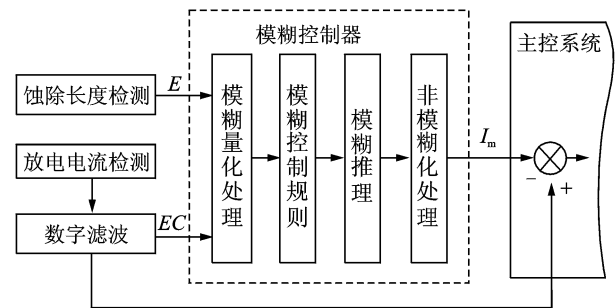


图 6 自适应模糊控制器结构框图

模糊控制器的设计目标是使伺服控制系统在模糊运算输出的阈值电流 I_m 的控制作用下实现稳定而快速的工件蚀除。为此根据实验数据映射确定输入输出变量的模糊集与论域; 根据积累的放电加工经验建立模糊控制规则和推理机制。

E 的模糊集为 $\{NB, NM, NS, NO, PO, PS, PM, PB\}$; I_m 与 EC 的模糊集均为 $\{NB, NM, NS, O, PS, PM, PB\}$ 。其中: NB 表示负大; NM 表示负

中;NS表示负小;NO表示负零;PO表示正零;PS表示正小;PM表示正中;PB表示正大;O表示零。

E 与 EC 的论域为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$; I_m 的论域为 $\{-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ 。

建立模糊控制规则如表1所示。

表1 模糊控制规则表

E	EC						
	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	O	O
NM	PB	PB	PB	PB	PM	O	O
NS	PM	PM	PM	PM	O	NS	NS
NO	PM	PM	PS	O	NS	NM	NM
PO	PM	PM	PS	O	NS	NM	NM
PS	PS	PS	O	NM	NM	NM	NM
PM	O	O	NM	NB	NB	NB	NB
PB	O	O	NM	NB	NB	NB	NB

模糊变量 E , EC 和控制量 I_m 的隶属度函数如图7所示。

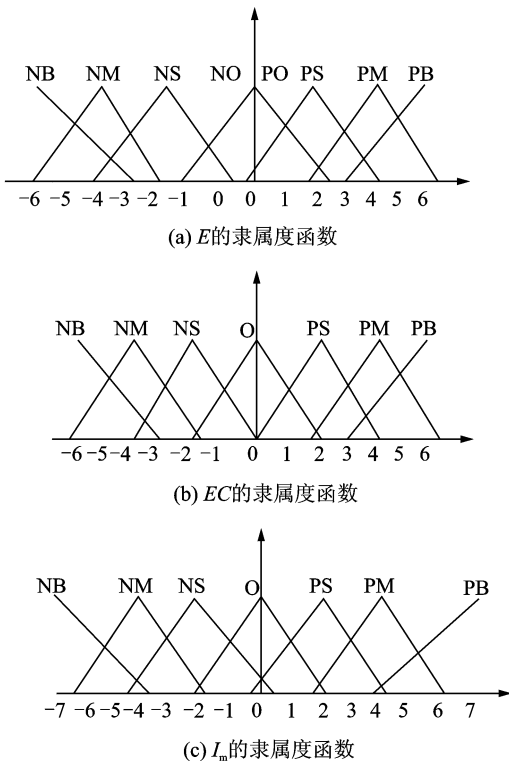


图7 模糊控制器隶属函数图

设某时刻 t 模糊控制器的两个输入量的值分别为 e 和 ec ,则输出

$$I(t) = e \cdot [(NB_E + NM_E) \times PB_{I_m}] \cdot ec \cdot [(NB_{EC} + NM_{EC}) \times PB_{I_m}]$$

利用最大隶属度法,将输出从模糊量转为精确量,制作出模糊控制表用于系统编程,如表2所示。

表2 模糊控制表

E	EC												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	7	6	7	6	7	7	7	4	4	2	0	0	0
-5	6	6	6	6	6	6	6	4	4	2	0	0	0
-4	7	6	7	6	7	7	7	4	4	2	0	0	0
-3	7	6	6	6	6	6	6	3	2	0	-1	-1	-1
-2	4	4	4	5	4	4	4	1	0	0	-1	-1	-1
-1	4	4	4	5	4	4	1	0	0	0	-3	-2	-1
0	4	4	4	5	1	1	0	-1	-1	-1	-4	-4	-4
1	4	4	4	5	1	1	0	-1	-1	-1	-4	-4	-4
2	1	2	1	2	0	-3	-4	-4	-4	-4	-3	-4	-4
3	0	0	0	0	-3	-3	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6
4	0	0	0	-2	-4	-4	-7	-7	-7	-6	-7	-6	-7
5	0	0	0	-2	-4	-4	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6
6	0	0	0	-2	-4	-4	-7	-7	-7	-6	-7	-6	-7

3 基于往复渐进运动控制的硅切割实验

为了验证所提出方法的有效性和正确性,通过对传统高速往复走丝电火花线切割机床进行数控系统改造,自主开发了能够实现本文所述往复渐进新型进给方式的电火花线切割运动控制实验系统,如图8所示。



图8 电火花线切割运动控制实验系统

图9所示为使用所开发的实验系统结合往复渐进自适应控制技术进行块状硅材料切割加工的场景。设定脉冲电源脉宽为 $4\mu\text{s}$,占空比1:3,功率管输出为7个。实验表明,提出的新方法能够实现硅材料的持续有效切割,在复杂多变的工况下能够自适应地调整进给速度,无弯丝断丝现象发生。实验过程中通过查看手动进给摇柄的转动,可明显感知到进给机构在做快速往复渐进式运动。由于回退与返回的速度很快,加上电极丝的轻微振动以及加工表面的不平整,实验中可观察到连续而强烈的电火花,这说明新方法仍可获得较高的加工效率。

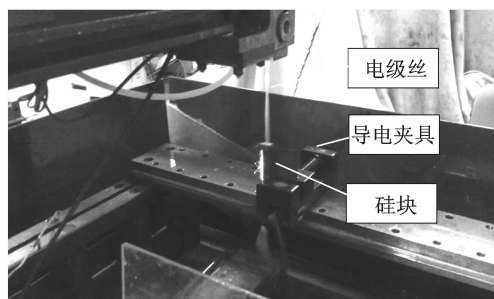
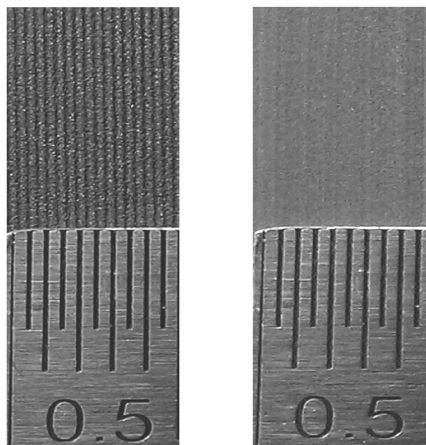


图9 采用往复渐进控制方式切割硅料的实验场景

为了考察加工后的硅表面质量,把分别采用传统方法与本文所述方法切割出来的硅片放在一起进行局部放大对比,如图10所示。其中左图为传统方法加工出来的硅片表面形貌,右侧为往复渐进运动控制方法加工出来的硅片,可见,利用本文所述方法加工得到的硅片表面换向纹已被显著地弱化,这与原先的理论分析是一致的。



(a) 传统方法

(b) 往复渐进运动控制方法

注:图中一个刻度为0.5 mm

图10 样件加工表面形貌对比图

4 结 论

针对传统电火花线切割机床进给跟踪伺服系统难以正常完成硅材料切割的问题,提出了一种往复渐进式进给的运动方式,并通过自适应模糊控制不断实时地调整运动参数,从而使得硅材料电火花线切割加工得以持续顺利地顺利完成。理论分析与实验表明,所提出的进给运动控制方法切实可行,并且具有以下优点:

(1)进给伺服控制系统无需检测短路状态、亦无需检测放电间隙的大小就能保证加工顺利进行,可以从根本上防止过进给和欠进给的产生。

(2)回退的过程中均匀地加大了加工间隙,使蚀除的切屑可以顺利地排出,有利于被加工表面的洗涤以及电极丝的冷却,从而改善加工质量,提高加工效率。

(3)往复进给使得工件表面因电极丝换向产生的加工差异叠加并均匀化,从而明显地弱化工件表面的换向纹。

(4)新方法虽然是针对半导体硅材料加工提出来的,但由于无需检测短路状态,对复杂工况具有较强的自适应调节能力,完全可拓展移植到锗、金属等材料的电火花加工领域。

参考文献:

- [1] 邱明波,黄因慧,刘志东,等. 太阳能硅片制造方法研究现状[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(8): 1017-1020.
Qiu Mingbo, Huang Yinhui, Liu Zhidong, et al. A review of the fabrication methods for solar silicon wafer[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, 27(8): 1017-1020.
- [2] Luo Y F, Chen C G, Tong Z F. Investigation of silicon wafering by wire EDM[J]. Journal of Materials Science, 1992, 27(21): 5805-5810.
- [3] 王振龙,夏梁俊,赵万生. 半导体硅材料的电火花加工技术研究[J]. 电加工与模具, 2004(1): 13-16.
Wang Zhenglong, Xia Liangjun, Zhao Wansheng. Research on micro-EDM for semiconductor silicon [J]. Electromachining & Mould, 2004(1): 13-16.
- [4] Rakwal D, Bamberg E. Slicing cleaning and kerf analysis of germanium wafers machined by wire electrical discharge machining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(8): 3740-3751.
- [5] Takino H, Ichinohe T, Tanimoto K, et al. Cutting

- of polished single-crystal silicon by wire electrical discharge machining[J]. Precision Engineering, 2004, 28(3): 314-319.
- [6] Peng W Y, Liao Y S. Study of electrical discharge machining technology for slicing silicon ingots[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140: 274-279.
- [7] 刘志东,曹银凤,邱明波,等. 进电方式对高阻半导体硅放电加工影响研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(6): 725-728.
- Liu Zhidong, Cao Yinfeng, Qiu Mingbo, et al. Research on influence different conduction modes on EDM of high resistivity semiconductor silicon[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(6): 725-728.
- [8] 刘志东,邱明波,汪炜,等. P型太阳能级硅电火花线切割机理及工艺研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(5): 631-635.
- Liu Zhidong, Qiu Mingbo, Wang Wei, et al. Mechanism and process of wire-cut electrical discharge machine on P-type solar silicon[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(5): 631-635.
- [9] 赵万生. 先进电火花加工技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- Zhao Wansheng. Advanced electrical discharge machining technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004.
- [10] 刘志东,李建军,程国柱. 高速走丝电火花线切割表面条纹的成因研究[J]. 航空精密制造技术, 2009, 45(1): 35-38.
- Liu Zhidong, Li Jianjun, Cheng Guozhu. Research on forming reason of cutting surface stripe in HSWEDM [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2009, 45(1): 35-38.