

DOI: 10.11991/yykj.201504004

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20160326.1805.004.html>

微细电火花加工单脉冲热作用机理研究

王春梅¹, 褚旭阳², 洪永强², 李红¹, 张利琼¹, 陆蕴香¹

1. 贵州师范大学 机械与电气工程学院, 贵州 贵阳 550001;

2. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005

摘 要: 为了解微能量单脉冲放电加工原理, 文中从微细电火花单脉冲放电加工具有放电时间短、放电通道半径小、能量密度高等特点入手, 从单脉冲热作用模型的放电通道半径和能量分配系数方面对当前电火花单脉冲蚀出模型进行改进。建立了时变放电通道的热作用模型, 并验证了模型的正确性。提出了单脉冲热作用模型中能量分配到工件表面的百分比系数随着放电参数的变化而变化的规律, 为微细电火花的广泛应用奠定基础。

关键词: 微细电火花; 单脉冲; 数值模拟; 能量分配系数; 热作用

中图分类号: TG661

文献标志码: A

文章编号: 1009-671X(2016)02-059-06

The single pulse thermal effect mechanism of micro-EDM

WANG Chunmei¹, CHU Xuyang², HONG Yongqiang², LI Hong¹, ZHANG Liqiong¹, LU Yunxiang¹

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guizhou Normal University, Guiyang 550014, China

2. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China

Abstract: The single pulse micro electric discharge machining (micro-EDM) has the characteristics of short discharge time, small discharge channel radius, high energy density, etc. Considering these characteristics, the EDM single pulse erosion model is improved in plasma channel radius and energy distribution coefficient of the single pulse thermal effect model, to establish the thermal effect model of micro-EDM machining. The correctness of the model is verified by a reliable experimental method, which lays a foundation for the wide application of micro-EDM.

Keywords: micro-EDM; single pulse; numerical modeling; energy distribution coefficient; thermal effect

在微细电火花加工中, 当工作介质被电离、击穿形成放电通道后, 通道中的正离子与电子在极间电场的作用下高速地向负极和正极运动并发生剧烈碰撞, 从而在放电通道中产生大量的热量。同时, 正极和负极表面分别受到电子流和离子流的高速冲击, 动能转换为热能, 在电极放电点表面产生大量的热, 使整个放电通道形成一个瞬时高斯分布热源, 导致金属材料局部熔化, 甚至气化, 与此同时, 由于气体迅速热膨胀, 使得体积剧增, 并产生了局部微爆炸, 导致熔化、气化的金属材料抛出, 从而形成了放电凹坑。因此, 微细电火花加工过程就是电极表面的金属材料受到等离子体高温高压的作用被蚀除下来的微观物理过程^[1-5]。在电火花加工的热作用过程中, 热源模型的准确与否是单脉冲放电热作用数

值模拟的关键问题。国内外很多学者对电火花单脉冲放电的数值模拟中的放电通道直径都是采用经验公式进行计算^[4, 6-8], 而且作用在工件表面的单脉冲能量分配系数也是选取前人的经验值。但是在微细电火花单脉冲放电过程中, 不同的脉冲电源、放电参数以及工件材料都将导致热源模型的等离子体放电通道直径和能量分配系数各不相同^[9]。针对微细加工过程的特点, 文中采用既适用于微细电火花加工的等离子体扩展模型又结合了数值模拟和实验结果的方法来确定其能量分配系数, 从而进一步完善微细电火花加工单脉冲热源模型。

1 时变放电通道单脉冲放电热源模型

电火花加工过程中存在着复杂的能量转换, 但主要表现为温度场的变化, 即温度在等离子体与工件之间的传递。热传递有 3 种方式: 热传导、热辐射和热对流。电火花加工过程中同时存在着这 3 种热

收稿日期: 2015-04-03. 网络出版日期: 2016-03-26.
基金项目: 贵州省教育厅基金项目(5392).
作者简介: 王春梅(1981-), 女, 副教授, 博士.
通信作者: 王春梅, E-mail: wcm20006@163.com.

传导方式,用能量分配系数调节辐射传热后,等离子体与工件之间的能量交换方式为热传导和热对流。为了简化模型,这里按均匀的轴对称圆柱体模型进行计算,公式为^[10]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

微细电火花加工是一个随机性和复杂性很高的过程,为了能够对传热过程进行数学化建模,作出如下假设:1)热传导模型具有对称性;2)热传导是热量传递的唯一方式;3)工件材料是均匀且各向同性;4)工件材料的属性随温度改变;5)不考虑材料的去除问题;6)忽略熔融金属的体积变化和流动效果。

1.1 温度场热源模型

为解决热源问题,很多学者在对电火花加工放电过程进行理论分析仿真模拟后提出一种普遍接受的较为贴近实际的热流密度模型—高斯热源。

图1所示为高斯热源作用在工件表面的物理模型,即电火花加工仿真过程中用到的热流密度模型。

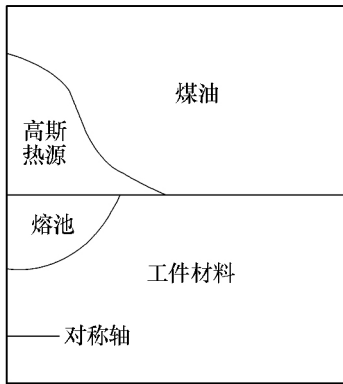


图1 单脉冲放电热作用物理模型

热流的高斯分布概率密度函数为

$$q(r) = \frac{3.15\eta ui}{\pi R^2(t)} e^{-\frac{3r^2}{R^2(t)}} \quad (2)$$

式中: $q(r)$ 为半径 r 处的热流密度, w/m^2 ; $R(t)$ 为放电通道半径 m , $r \leq R(t)$; η 为常数,分配到工件的能量分配系数。

式(2)表明,热流密度随着等离子体半径变化呈高斯概率密度分布。放电通道半径 $R(t)$ 是随放电时间变化的函数,意味着热流密度是同时随着时间和空间变化的函数。

1.2 热边界条件和初始条件

初始条件是指热传导过程开始时整个模型所具有的状态,为已知值。为了得到每一节点热平衡方程的唯一解,模型的边界条件与初始条件要尽量反应火花放电的实际情况。

1) 初始条件

由于在模拟的初始时刻,模型所处的温度状态为环境温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$,即 298.15 K ,数学表达式为 $T(t=0) = 298.15\text{ K}$ 。

2) 边界条件

图2所示为模型的热边界条件。 F_1 为热流密度加载平面, F_2 、 F_3 和 F_4 为模型边界。由于模型为半无限大物体, F_2 、 F_3 和 F_4 等3个平面可视为无穷远处,其本身温度与外界环境温度相同,数学表达式为 $T(F_2, F_3, F_4) = 298.15\text{ K}$ 。

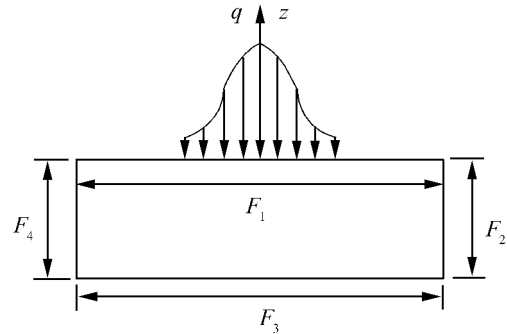


图2 热边界条件模型

平面 F_1 上放电通道作用范围内的热流密度在不同的放电条下随时间和半径的变化并不相同,数学表达式为

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} |_{r \leq R} = q(r)$$

式中: k 为热传导系数; n 为平面的法线方向; $q(r)$ 为热流密度。

平面 F_1 上除放电通道以外的区域存在对流换热,数学表达式为

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} |_{r > R} = h(T_s - T_0)$$

式中: h 为工件与工作介质的表面对流换热系数, T_s 为工件表面瞬时温度, T_0 为工作介质温度。

1.3 时变放电通道半径

在微细电火花加工的热传导过程研究中,放电通道半径的大小是热源模型的重要参数。目前,产生了很多较为成熟的经验公式。文中在采用经验公式进行微能量的单脉冲仿真以后,发现仿真结果与实验结果差异明显。所以采用作者自己建立的放电通道扩展模型,得到了不同放电条件下放电通道半径随时间的变化过程,并拟合出放电通道半径随时间变化的曲线,如式(3):

$$R = k_1 \times \exp(-k_2 \times t) - k_3 \times \exp(-k_4 \times t) \quad (3)$$

如 RC 单脉冲放电电容为 $10\ 000\text{ pF}$,放电电压为 $40、60、80、100\text{ V}$ 时 $k_1、k_2、k_3$ 和 k_4 取值如表1。

表 1 10 000 pF 时拟合放电通道半径的系数值

电压/V	k_1	k_2	k_3	k_4
40	1.174×10^{-5}	1.651×10^4	9.689×10^{-6}	7.077×10^6
60	1.439×10^{-5}	2.678×10^4	1.19×10^{-5}	6.98×10^6
80	1.624×10^{-5}	2.204×10^4	1.343×10^{-5}	6.983×10^6
100	1.748×10^{-5}	2.512×10^4	1.446×10^{-5}	6.955×10^6

1.4 相变处理

热焓法通过定义材料随温度变化的焓值来考虑相变潜热,而焓值的计算需要用到比热容值,因此文中采用等效比热容法来考虑相变问题。

1.5 能量分配系数

电火花放电情况的随机性使得在不同条件下得到的能量分配系数并不能很好地适用各种情况。通过我们建立的放电通道扩展模型求解放电通道半径,通过热作用与实验对比的方式,可以有效地解决放电能量分配系数难以确定的弊端,图 3 为文中确定放电能量分配系数的流程。

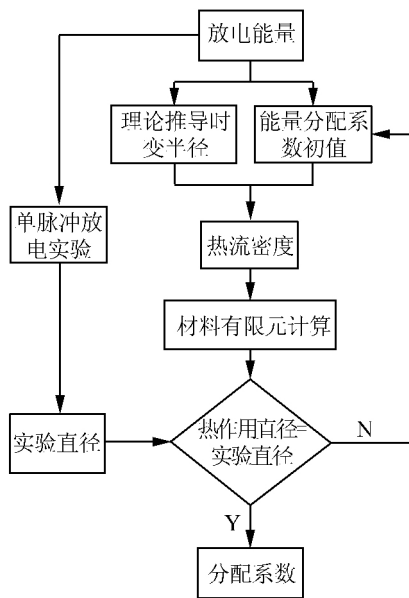


图 3 工件表面能量分配系数确定流程

2 时变放电通道单脉冲放电热作用的数值模拟

文中利用 FLUENT 的瞬态热分析以及强大的非线性求解功能,在前面建立的传热模型的基础上,进行微细电火花加工单脉冲放电过程的有限元分析。

2.1 物性参数

电火花加工过程中产生的瞬时放电使得放电点周围温度随时间急剧变化,金属材料的物理性质会随着温度的变化而变化,文中采用随温度变化的取值方式,可以更好地符合实际情况。选用钛合金作

为工件材料进行数值模拟,其主要物性参数有比热、热传导率和密度等,钛合金物性参数与温度的关系如表 2、3 所示。

表 2 计算钛合金材料的物理参数

名称	单位	数值
熔化温度	°C	1 604 - 1 660
固相线温度	K	1 877
液相线温度	K	1 933
密度	kg/m ³	4 430
熔化潜热	J / kg	2.92×10^5
粘度	Pa · s	0.001
环境温度	T_{∞} / K	300

表 3 钛合金比热、热传导系数 - 温度关系

温度/K	比热/ J · (kg · °C) ⁻¹	热传导/ kg · m/(s ³ °C) ⁻¹
293	611	6.8
373	624	7.4
473	653	8.7
573	674	9.8
673	691	10.3
773	703	11.8
873	708	12.4
1 073	727	14.4
1 273	751	15.8
1 673	783	24.3
1 873	878	22.2

2.2 网格划分

对于 RC 脉冲放电和晶闸管脉冲放电,由于放电通道的轴对称性,为了减少计算量,选用 $30 \times 10 \mu\text{m}$ 的平面做为计算区域就可以分析单脉冲的热作用机理。在数值模拟分析中,网格质量影响计算精度,但一味地提高网格质量,则会使计算消耗时间加长。为提高计算效率而不影响计算精度,文中采用的网格划分为 $0.05 \mu\text{m}$ 。通过有限元方法,利用高斯热源对 RC 脉冲电源放电过程进行仿真计算,计算蚀坑直径、半径、深径比及能量利用率。

2.3 加载与求解

针对 RC 脉冲电源中的时变放电通道半径,时变放电电压和时变放电电流编制时变热流密度函数的方式来进行温度载荷加载,选用 UDF 编程进行热流密度的加载,对流载荷加载时只需给出环境温度 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 以及煤油对流换热系数 $800 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ 即可,加载过程如图 4 所示,图中 R 为不同加工参数下由理论计算拟合的放电通道半径,其中 k_1 、 k_2 、 k_3

和 k_4 的取值与放电参数有关。

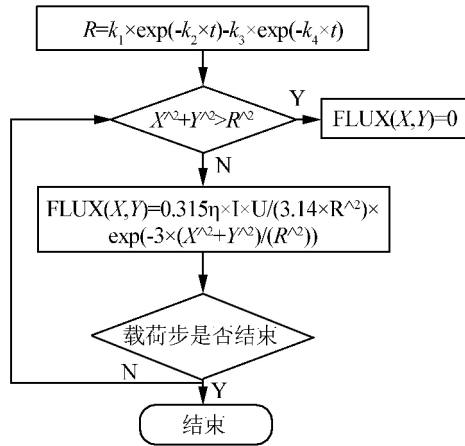


图 4 热流密度载荷加载流程图

文中的温度场热分析是带有相变分析的瞬态非线性分析,求解设置如下: a) 选择压力求解器; b) 选用 VOF 多相流模型,能量模型,凝固熔化模型; c) 指定材料的物性参数; d) 定义初始条件是指所模拟物理过程在仿真开始时所处的物理环境,文中为常值温度、大气压强、重力及其方向; e) 指定边界条件; f) 流场初始化。

2.4 仿真结果

1) 单脉冲放电数值模拟

选取 RC 脉冲放电条件进行数值模拟,其中放

电电压为 80 V,放电电容为 10 000 pF,通过仿真结果与实验结果对比,这里选择分配到工件的能量百分比为 40% 进行数值模拟计算是最合适的。其热作用结果如图 5 所示,为单脉冲放电能量热作用的凹坑温度云图。从图 5(a) 中可以发现,在热源的中心温度最大,沿着半径方向和深度方向逐渐降低,超过熔融物熔化温度时,其固体变化为液体和气体;图 5(b) 中红色部分为热作用凹坑液体体积系数。由 FLUENT 的文件写出功能可以获取凹坑的直径和深度,从表 4 中可知热作用凹坑直径为 18.1 μm ,深度为 3.7 μm 。

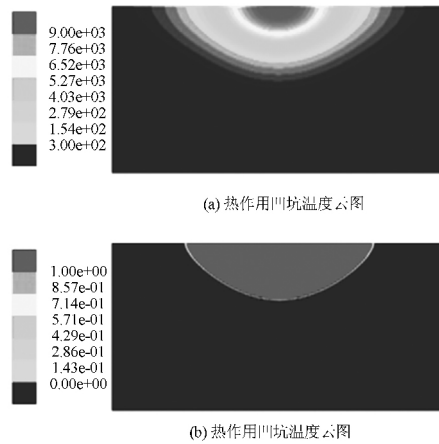


图 5 10 000 pF80 V 时热作用凹坑云图

表 4 10 000 pF80 V 时仿真与实验结果

电压/V	电容/pF	能量分配系数	放电通道直径/ μm	热作用凹坑直径/ μm	热作用凹坑深度/ μm	实验凹坑直径/ μm	实验凹坑深度/ μm
80	10 000	0.4	15.53	18.1	3.7	18.59	2.26

2) 不同放电参数单脉冲放电数值模拟

选取 16 组参数对其进行数值模拟,放电电容为 2 200、4 000、8 800、16 000 pF; 放电电压为 45、60、90、

120 V 对单脉冲放电热作用过程进行数值模拟和放电实验,不同放电参数下的热作用凹坑直径和放电实验直径如表 5 所示。

表 5 单脉冲放电热作用与放电实验数据对比

电容/pF	电压/V	能量/ μJ	能量分配系数	热作用直径/ μm	试验直径/ μm	电容/pF	电压/V	能量/ μJ	能量分配系数	热作用直径/ μm	试验直径/ μm
2 200	45	2.23	0.6	9.5	10.23	8 800	45	8.91	0.5	15.5	16.13
2 200	60	3.96	0.5	11	10.92	8 800	60	15.84	0.5	18.5	20.72
2 200	90	8.91	0.3	13.9	14.14	8 800	90	35.64	0.25	21.8	22.38
2 200	120	15.84	0.25	16.7	16.74	8 800	120	63.36	0.25	25.2	24.06
4 000	45	4.05	0.5	10.5	11.19	16 000	45	16.2	0.5	18.16	18.43
4 000	60	7.2	0.5	14.3	13.12	16 000	60	28.8	0.5	22	21.78
4 000	90	16.2	0.3	17.2	16.81	16 000	90	64.8	0.25	26	25.73
4 000	120	28.8	0.3	19.9	20.28	16 000	120	115.2	0.2	30	27.97

通过数值模拟和实验结果可知:

1) 放电参数对凹坑直径的影响

在 RC 脉冲电源进行单脉冲数值模拟和放电实验过程中,当电容一定时,凹坑直径随着放电电压的

增加而增加;当放电电压一定时,凹坑直径随着放电电容的增加而增加。同能量下,电容较大时,凹坑直径较大,说明放电电容对电火花加工影响较大,放电电压对放电加工的影响次之。

2) 放电参数对工件能量分配系数的影响

a) 放电电压对工件能量分配系数的影响

在 RC 单脉冲放电热作用过程中,如表 5 所示,当放电电容一定时,能量分配系数随着放电电压的增加而减小,当放电电容为 8 800 pF 时,凹坑的能量分配系数从 45 V 的 0.5 下降到 120 V 的 0.25。这是因为随着放电电压的增加,临界放电间隙增大,等离子体体积增加,单个脉冲能量用于等离子体扩展的能量增加,作用在工件表面的能量分配系数相应减小。

b) 放电电容对工件能量分配系数的影响

从表 5 可以看出,当放电电压一定时,能量分配系数随着放电电容的增加基本不变,当放电电压为 120 V 时,电容取值不同,其能量分配系数维持在 0.2~0.3。这是因为放电电压一致,随着放电电容的增加,放电时间增加,等离子体扩展时间较长,用于等离子体扩展的能量较多;另一方面放电时间较长,热作用过程增加,能量利用较充分,总的来说分配在工件表面的能量占总能量的百分比差不多。

c) 放电能量对工件能量分配系数的影响

为了获得更加准确的凹坑尺寸,放电能量是一个重要的加工参数。从表 5 可以看出,在单脉冲放电过程中,随着放电参数的改变,作用在工件表面的能量百分比系数也跟着改变,其中,当单脉冲放电能量较小时,其作用在工件表面的能量系数更大,当放电能量为 2.227 5 μJ 时,其放电能量百分比系数达到 0.6,随着放电能量的增加,其放电能量百分比系数降低,当放电能量为 115.2 μJ 时,其放电能量百分比系数为 0.2。这是因为能量低时,脉冲持续时间短,传到周围介质的能量少,利用率就高,放电点的温度很高,相应的作用在工件表面的能量百分比增加。所以对于不同的放电加工条件,其能量利用率各不相同。这与 Y. S. Wong 等^[11]在之前的研究结果相吻合,Y. S. Wong 等认为当考虑全部被气化或者全部被熔化时,低能量的利用率比高能量的利用率高 7~8 倍,当能量低时,其能量利用率更高。因此,电火花单脉冲放电过程中,作用到工件表面的能量分配系数随着放电参数的变化而变化,不能选定一个恒定的数值对其进行分析,否则分析过程和分析结果会偏离真实结果。

3 单脉冲放电实验

选用与数值模拟相同的加工条件,采用我们自

己设计的 RC 单脉冲放电实验平台进行单脉冲实验,实验原理如图 6 所示。选用 SU70 扫描电子显微镜和 SPA-400 型扫描探针显微镜对单个凹坑进行扫描检测得到凹坑的二维形貌和三维形貌参数,其放电凹坑的形貌如图 7、8 所示,当放电电压为 80 V 放电电容 10 000 pF 时,放电凹坑直径为 18.59 μm、凹坑深度为 2.26 μm。图 8 所示为不同能量下的凹坑形貌和凹坑大小,随着放电能量的增加,凹坑的直径越大。数值仿真与实验结果相比,凹坑在直径方向的数值与实验结果相吻合,但是熔池深度被高估。熔池深度被高估原因如下: 1) 仿真的冷却速率为 10⁹ K/s 高于临界值 10⁵ K/s。2) 在仿真过程中熔化的金属没有及时抛出,在整个热作用过程由于热传导的原因导致了凹坑的深度偏大,由于数值模拟过程都是简化的数学模型,其模拟值与实验值存在一定的差距是难以避免的。

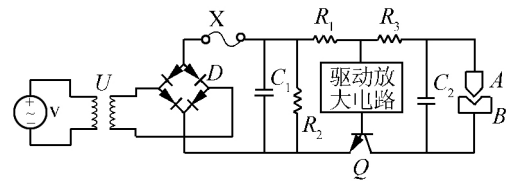
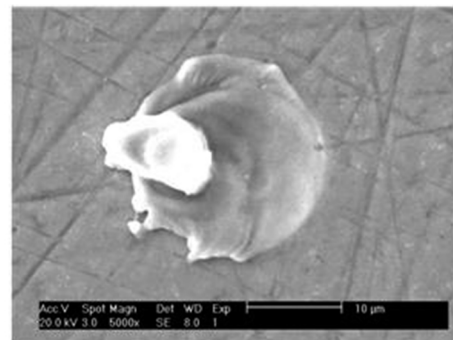
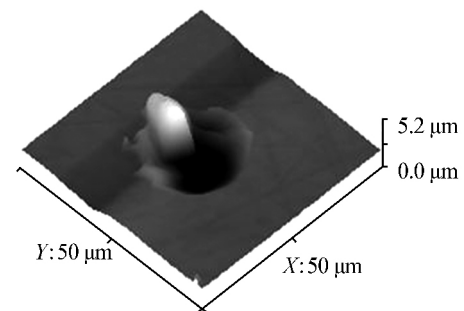


图 6 RC 脉冲电源单脉冲放电原理



(a) 放电凹坑 SEM 扫描图



(b) 放电凹坑 AFM 扫描图

图 7 单脉冲放电凹坑形貌

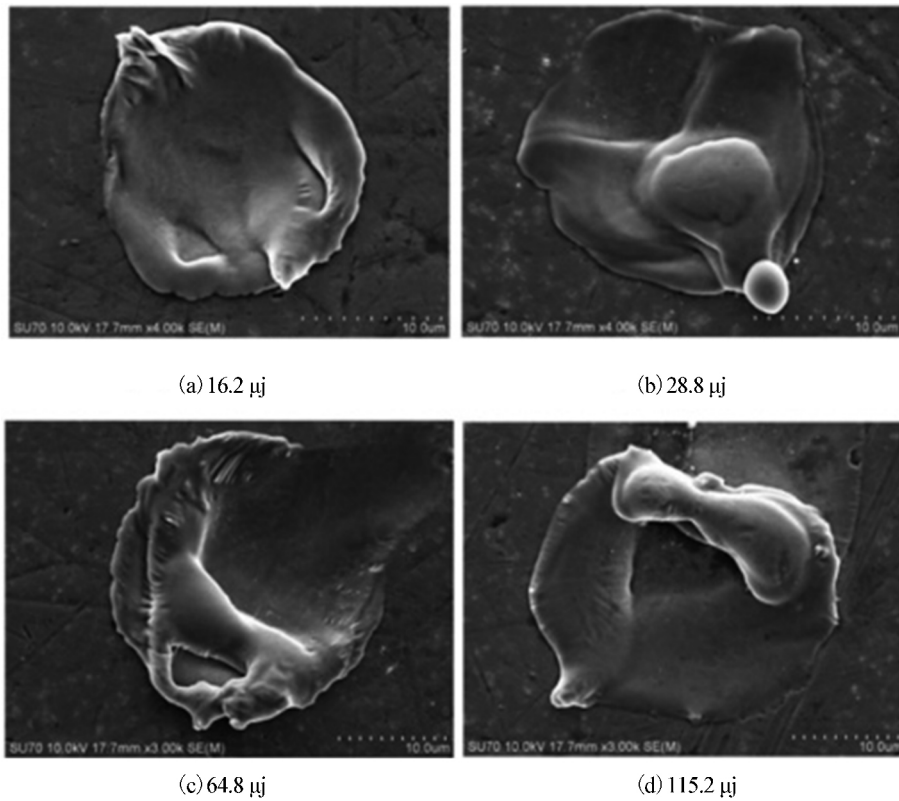


图 8 不同放电条件下的放电凹坑

4 结论

文中研究了微细电火花单脉冲加工热作用机理,通过数值模拟和实验验证相结合的方式完善了微细电火花单脉冲放电加工的热作用模型,建立了适合微细电火花单脉冲放电通道半径模型,并且提出了单脉冲热作用模型中能量分配到工件表面的百分比系数,为微细电火花的广泛应用奠定了基础。

与前人研究的凹坑数值模型相比,我们的数值模型有如下的改进:1)建立的数值仿真模型在等离子加热阶段的参数是通过自己修正的适合低放电能量(小于 100 μJ)的等离子通道数学模型(文中建立的新型热源等离子体扩展模型);2)文中的材料物性参数是随着温度的变化而变化的,高冷却速率时的材料膨胀因素被包括;3)为了验证文中所建立的数值模型,我们设计了更为可靠的单脉冲放电电源,单脉冲放电电源是数值仿真和单脉冲实验过程中最为重要的设备,为单脉冲数学模型的建立和验证提供了十分关键的作用。

参考文献:

[1]BECK J V. Transient temperatures in a semi-infinite cylinder heated by a disk heat source[J]. International journal of heat and mass transfer, 1981, 24(10): 1631-1640.
 [2]DIBITONTO D D, EUBANK P T, PATEL M R, et al. Theoretical models of the electrical discharge machining process. I. A simple cathode erosion model[J]. Journal of applied physics, 1989, 66(9): 4095-4103.

[3]KANSAL H K, SINGH S, KUMAR P. Numerical simulation of powder mixed electric discharge machining (PMEDM) using finite element method [J]. Mathematical and computer modeling, 2008, 47(11/12): 1217-1237.
 [4]PATEL M R, BARRUFET M A, EUBANK P T, et al. Theoretical models of the electrical discharge machining process. II. The anode erosion model [J]. Journal of applied physics, 1989, 66(9): 4104-4111.
 [5]PANDIT S M, RAJURKAR K P. A stochastic approach to thermal modeling applied to electro-discharge machining [J]. Journal of heat transfer, 1983, 105(3): 555-562.
 [6]DAS S, KLOTZ M, KLOCKE F. EDM simulation: Finite element-based calculation of deformation, microstructure and residual stresses [J]. Journal of materials processing technology, 2003, 142(2): 434-451.
 [7]YEO S H, KURNIA W, TAN P C. Electro-thermal modelling of anode and cathode in micro-EDM [J]. Journal of physics D: applied physics, 2007, 40(8): 2513-2521.
 [8]REVAZ B, WITZ G, Flükiger R. Properties of the plasma channel in liquid discharges inferred from cathode local temperature measurements [J]. Journal of applied physics, 2005, 98(11): 113305.
 [9]ZAHIRUDDIN M, KUNIEDA M. Comparison of energy and removal efficiencies between micro and macro EDM [J]. CIRP annals-manufacturing technology, 2012, 61(1): 187-190.
 [10]JOSHI S N, PANDE S S. Thermo-physical modeling of die-sinking EDM process [J]. Journal of manufacturing processes, 2010, 12(1): 45-56.
 [11]WONG Y S, RAHMAN M, LIM H S, et al. Investigation of micro-EDM material removal characteristics using single RC-pulse discharges [C]//Proceedings of the 6th Asia Pacific Conference on Materials Processing. Taipei, China, 303-307.