

# 基于 ANSYS 电火花磨削蜂窝环温度场仿真研究<sup>\*</sup>

## Study on Temperature Field Simulation of Honeycomb Ring by EDM Based on ANSYS

沈阳航空航天大学机电工程学院 高 霖 孙 瑶 王 颀

**[摘要]** 建立电火花磨削蜂窝环的单脉冲放电模型,利用 ANSYS 对电火花磨削蜂窝环时的温度场分布进行有限元模拟,得到在不同峰值电流和脉宽条件下,放电点的温度场分布以及电参数与蚀除凹坑大小之间的关系。计算出蜂窝环放电凹坑的几何特征,与实际磨削条件下的表面粗糙度进行对比,并根据其加工特点进行修正,经修正后模拟的单脉冲放电凹坑几何特征可以近似表征实际连续电火花磨削的表面粗糙度。利用有限元模拟电火花磨削蜂窝环的温度场分布规律是可行的,且模拟过程精确、迅速。

**关键词:** 电火花磨削 蜂窝环 蚀除凹坑 温度场 有限元 表面粗糙度

**[ABSTRACT]** Single pulse discharge model of EDM honeycomb ring is established. The temperature field of EDM honeycomb ring is analyzed by ANSYS software, the temperature distribution under different peak current and pulse-on, and the relation between electrical parameters and depth, radius of discharge crater are obtained. Geometric features of discharge crater are calculated and contrasted with actual surface roughness. Simulation results are amended based on processing characteristics of single pulse discharge crater and can approximately reflect the actual surface roughness with continual grinding process. It is feasible to apply finite element method to research the temperature field distributed regularity of EDM honeycomb ring.

**Keywords:** EDM Honeycomb ring Discharge crater Temperature field Finite element Surface roughness

蜂窝环是航空发动机重要的密封零件,由蜂窝带和密封环等构成。密封环一般为圆环形,材质为含 Cr 的合金钢,其外圆与密封体相连,内圆与蜂窝带通过钎焊连接在一起。蜂窝带由厚度仅为 0.05~0.10mm 的镍基高温合金(GH3536)薄板在特殊模具成形设备上制成的正六面体蜂窝栅格经特殊设备焊接而成。封闭式蜂

窝状栅格将强大的气流切割分离为无数弱小涡流,对气流形成交叉阻尼,从而达到阻止泄露的密封效果。蜂窝密封具有较好的封严特性和转子动力学特性,重量轻、耐热性好,能提高机组的效率和稳定性,同时降低能源消耗,因此广泛应用于国内外各种喷气或涡扇发动机上<sup>[1-4]</sup>。

由于蜂窝环壁薄、刚性差、材料韧而粘且蜂窝表面质量规定严格,要求蜂窝表面粗糙度  $R_a \leq 0.8 \sim 1.6 \mu\text{m}$ ,表面变质层厚度  $\varepsilon \leq 0.02\text{mm}$  且不能有裂纹、残留毛刺和热影响区。因此难以用常规机械方法加工,而电火花磨削是实现蜂窝环加工的重要方法之一。电火花磨削是根据工具电极和工件之间的脉冲放电产生的电蚀现象,按照工艺要求,利用瞬时高温熔蚀工件表面材料,以达到对零件尺寸和形状要求的非接触式加工,具有无变形、无加工毛刺和尺寸精度高的优势<sup>[5]</sup>。电火花磨削加工时狭窄的极间通道(0.01~0.07mm)内达到 2000℃ 以上的高温且放电持续时间短、放电通道扩展很快,这对任何传感器都无能为力,因此目前对其放电过程的研究仍处于探索阶段<sup>[6]</sup>。有限元法为该问题的解决提供了手段,采用 ANSYS 模拟极间放电后的温度场变化,在不了解电火花磨削放电通道内确切情况下,也能实现对放电过程的模拟分析,从而对加工结果进行预测。

本文在利用 ANSYS 对电火花磨削蜂窝环进行单脉冲放电后的温度场模拟,计算出单脉冲条件下蜂窝环的放电凹坑几何特征,并与实际加工条件下的表面粗糙度进行对比,根据电火花磨削的特点对模拟的结果进行修正。

## 1 电火花磨削蜂窝环的试验设计

本试验是在规格为  $\phi 1600\text{mm}$  某型数控电火花磨削专机上进行的。该磨床为 6 轴位置数控,EDM 发电机与两极连接的导线数为 2 根。加工时,将蜂窝环固定在旋转工作台上,石墨圆棒状工具电极移入蜂窝环内弧面加工,工件与工具电极相向旋转并保持恒定的放电间隙,进而沿径向完成对蜂窝内径修圆的补偿加工,为提高加工效率,采用双电极同时加工。电极直接与脉冲电源和伺服控制系统相连接,与工作台和机床其他部分绝缘。采用圆棒状电极设计,有利于排屑和放电通道消除

<sup>\*</sup> 辽宁省自然科学基金资助项目(201202172)、辽宁省教育科学基金资助项目(2008537)资助。

电离和提高蜂窝环的加工精度<sup>[7]</sup>。选择粘度低、排屑好的煤油为工作液。为顺利排渣,加工时电极自转并采用下冲液形式。为获得较高的加工质量,试验采用正极性加工<sup>[8]</sup>,图1为电火花磨削蜂窝环的加工原理图。

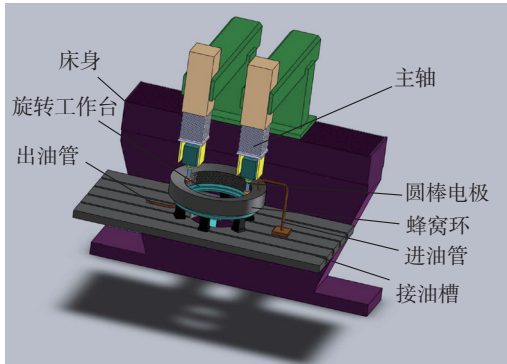


图1 电火花磨削蜂窝环加工原理  
Fig.1 Processing principle of EDM honeycomb ring

## 2 电火花磨削蜂窝环温度场模型的建立

### 2.1 数学模型的建立

在电火花磨削蜂窝环的过程中,石墨电极和蜂窝环的温度随时间急剧变化,材料的热物理性能也随温度发生很大的变化,由此可知电火花磨削加工温度场分析属于非线性热传导问题。在伺服系统的控制下,蜂窝环和石墨电极之间保持狭小的火花间隙,在此间隙中产生高频火花放电蚀除多余材料,从而达到磨削的目的。由于其放电点所在的区域很小,放电持续时间短,放电通道扩展很快,因此工具电极和工件是在时变半径、时变强度的热源作用下的半无限大物体。根据 Fourier 热传导理论得到圆柱坐标系下的非线性瞬态三维热传导方程<sup>[9]</sup>:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (kr \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{\phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (k \frac{\partial T}{\partial \phi}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) + q_v, \quad (1)$$

式中,  $T$  为温度, K;  $t$  为时间, s;  $c$  为材料比热容, J/(kg·K);  $\rho$  为材料的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $k$  为材料的导热系数, W/(m<sup>2</sup>·K);  $r$ 、 $\phi$ 、 $z$  为柱面坐标, m;  $q_v$  为温度场的内热源强度, W/m<sup>3</sup>。

电火花磨削蜂窝环过程具有很高的随机性和复杂性,为简化数学模型做以下假设:(1)不考虑内部热源的影响;(2)热传导模型为轴对称模型。经假设后,  $q_v=0$ , 在距温度场中心相同距离的不同点处温度相同,不进行热传递,可取  $\frac{\partial T}{\partial \phi}=0$ 。因此式(1)简化为:

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

电火花磨削蜂窝环是在以煤油为工作液的液体环境下进行的,虽然能量损失不可避免,但由于极间距小,分配在电极上的热量依旧占很大的比例<sup>[10]</sup>。分配到阴极和阳极上的能量基本一致,所占比例约为 25%,在分析的过程中采用煤油的对流换热系数 600W/(m<sup>2</sup>·K),空气对流换热系数为 18W/(m<sup>2</sup>·K)。

### 2.2 物理模型的建立

单脉冲条件下电火花磨削蜂窝环两电极间为热流密度呈高斯分布的热源,热源与工件之间存在热传导作用,工件和工作液之间有热对流作用,由于放电通道辐射到工件上的能量很少,所以忽略了辐射的作用。实际电火花磨削过程中的放电通道形状是不规则的,由于通道内的粒子数量巨大,根据平均概率算法认为放电通道是等截面的圆柱体。

### 2.3 蜂窝环材料的非线性热物参数与建模

电火花磨削过程中,放电通道内的工件温度变化程度大,将各热物性参数看作恒量是不合理的,因此比热容、热传导系数等热物性参数应看成是温度的非线性函数。通过试验得到高温合金(GH3536)的比热容、热传导系数和温度变化规律,如表1所示。建模时,考虑到放电通道的对称性和计算效率问题,建立 1/4 模型进行仿真,模型尺寸为 100 μm × 100 μm × 100 μm。由于相变问题的存在,实体分网选用 solid70 低阶单元,为 8 节点六面体单元。

## 3 求解与分析

### 3.1 温度场模拟结果与分析

在模拟计算过程中做如下假设:一个脉冲只形成一个放电通道;放电点热源为静止热源;在材料蚀除过程中,气化和熔化的材料被全部带出放电凹坑。图2

表1 高温合金(GH3536)的热物性参数

参数	数值										
温度 $T/K$	295	375	475	575	675	775	875	975	1075	1175	1275
导热率 $\lambda / (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	10.40	13.37	16.43	19.56	22.69	24.87	26.01	27.11	28.02	28.26	28.43
比热容 $c / (J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	352.6	372.7	410.2	468.3	525.8	590.6	650.2	703.9	723.7	697.5	563.6

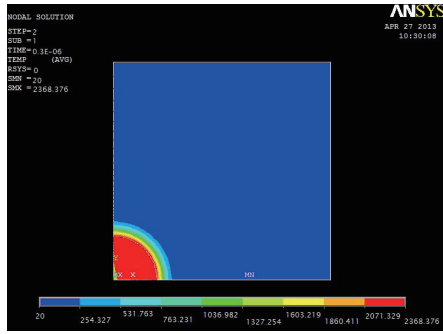


图2 蜂窝环温度场分布

Fig.2 Temperature field distribution of honeycomb ring

是在峰值电流为 7A, 脉冲宽度为 50 $\mu$ s 模拟条件下得到的蜂窝环放电点温度分布, 放电点温度最高可达到 2368.376 $^{\circ}$ C, 外环面和上下表面温度较低。分析原因是加工开始时, 蜂窝环材料 (GH3536) 被瞬间击穿, 热流密度高, 从而造成了工件材料升温快, 使得部分材料因汽化而被抛出。随后由于材料热传导率增大, 热蚀区域不断增大且放电区的温度开始逐渐下降, 气化现象不断减弱。

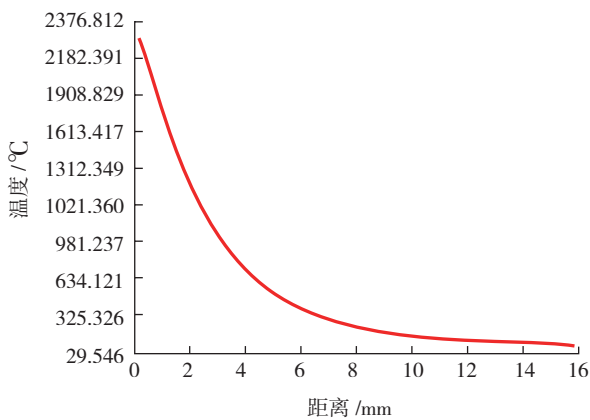


图3 半径方向温度变化

Fig.3 Temperature variations of radial distance from center

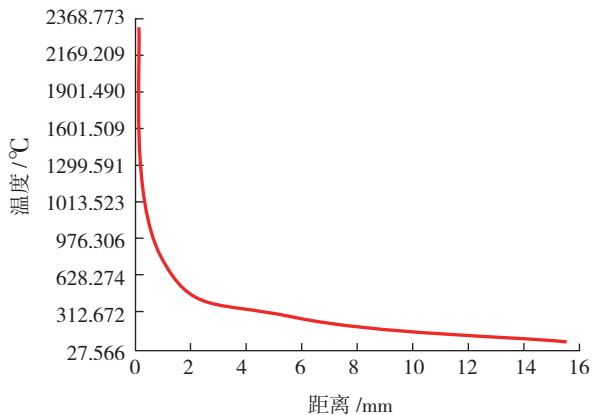


图4 深度方向温度变化

Fig.4 Temperature variations of depth from top place

图 3、4 为峰值电流为 5A, 脉冲宽度为 25 $\mu$ s 模拟条件下得到的高温合金 (GH3536) 半径方向和深度方向的温度分布图, 从图 3 中可知, 在半径随着放电中心半径的增加温度值从 2000 多 $^{\circ}$ C 减小到约 29 $^{\circ}$ C。分析原因是脉冲能量密度呈高斯分布, 离放电中心越远放电能量密度越低, 工件表面吸收的热量也越低。

从图 4 可知, 随着深度的增加从 2000 多 $^{\circ}$ C 迅速降低到约 27 $^{\circ}$ C, 其温度变化梯度大, 分析原因是材料的导热系数低, 在一定的放电时间内温度难以从表面传递到工件内部, 所以温度下降梯度大。

### 3.2 凹坑深度和半径的规律分析与数值修正

通过有限元分析模拟了单脉冲放电的凹坑情况, 读取了熔融半径的信息, 得到高温合金 (GH3536) 在不同脉冲宽度和电流参数下的蚀坑半径和深度。表 2 所示是脉冲宽度 10 $\mu$ s 时不同峰值电流下放电蚀坑的几何参数。表 3 所示为峰值电流为 3A, 不同脉冲宽度下的凹坑几何参数, 其中修正值是经过式 (4) 修正后的数值。

表2 脉冲宽度10 $\mu$ s时不同峰值电流下的仿真结果

峰值电流 I/A	凹坑半径 R/ $\mu$ m	凹坑深度 h/ $\mu$ m	深度修正值 $\delta$ / $\mu$ m
1	20.5	8.6	1.95
3	28.5	15.6	3.21
5	52.3	16.9	3.98
7	65.8	22.4	4.76
9	76.0	35.6	5.63

表3 峰值电流3A时不同脉冲宽度下的仿真结果

脉宽 w/ $\mu$ s	凹坑半径 R/ $\mu$ m	凹坑深度 h/ $\mu$ m	深度修正值 $\delta$ / $\mu$ m
5	25.3	10.3	2.39
10	28.5	15.6	3.21
25	31.2	19.7	4.87
50	46.8	22.4	6.42
75	59.6	25.6	6.83

从表 2、3 中的数据可知, 蚀除凹坑半径和深度都随着峰值电流和脉冲宽度的增大而增大, 但在半径方向的去除尺寸比深度方向大很多。分析原因是放电通道半径随着峰值电流的增大而增大, 因此凹坑在半径方向上呈明显增大趋势, 而高温合金 (GH3536) 的热导率很低, 放电热量难以在工件的深度方向传递。凹坑的半径随着脉冲宽度的增大而增大, 在深度方向上因为脉宽的增大导致热量在深度方向上的传播时间增加, 所以深度也随之增加。

将得到的凹坑深度仿真值  $h$  与该条件下的电火花

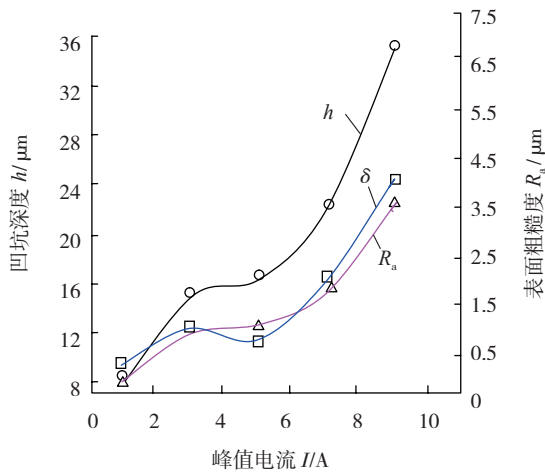


图5 峰值电流对表面质量的影响

Fig.5 Effects of peak current on surface quality

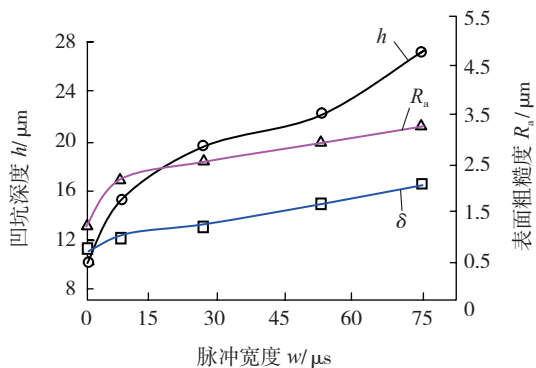


图6 脉冲宽度对表面质量的影响

Fig.6 Effects of pulse width on surface quality

磨削后的表面粗糙度实际值  $R_a$  进行比较,结果如图 5、6 所示,其中  $\delta$  为凹坑深度的修正值。

可以看出,仿真计算出的放电凹坑深度随脉冲宽度和峰值电流的变化趋势与实际测得的表面粗糙度的变化趋势是一致的,峰值电流和脉冲宽度的增加导致单个脉冲的放电能量增加,熔融区的半径和深度逐渐增大,但仿真值要比实际粗糙度测量值高很多<sup>[11]</sup>。原因是忽略了白层的存在,关于白层厚度,Rebello 等<sup>[12]</sup>通过试验得出白层厚度公式:

$$h_r = 1.35(I \cdot w)^{0.34}, \quad (3)$$

式中,  $I$  为放电脉冲的峰值电流,  $w$  为放电脉冲宽度。

如果把白层近似认为是熔化层,则可以认为放电凹坑实际深度  $\hat{h}$  和半径  $\hat{R}$  分别为:

$$\begin{cases} \hat{h} = h - h_r \\ \hat{R} = R - h_r \end{cases} \quad (4)$$

经过式(4)修正后凹坑的深度非常接近实际表面

粗糙度。

## 4 结论

(1) 建立了电火花磨削蜂窝环的仿真模型,模拟出放电点的温度分布,最高温度为 2368.376℃。模拟结果得出在蚀除凹坑半径方向,离放电点中心越远温度越低,这与高斯热源模型有关,离放电点中心越远,能量密度越低,工件吸收的热源就越少;在凹坑深度方向,离放电中心点越远温度越低,但是递减梯度比半径方向大,这是因为工件内部的能量主要是依靠传热,由于高温合金的导热系数低,难以传递到工件内部。

(2) 通过对凹坑深度仿真值与实际磨削条件下的表面粗糙度进行对比发现,仿真值与实际值存在一定差异,根据电火花磨削蜂窝环的加工特点,分析了出现差异的原因并进行修正,得到的修正值与试验值比较吻合。

(3) 试验结果和有限元分析结果表明:用 ANSYS 有限元分析软件模拟电火花磨削蜂窝环的热温度场是可靠的,能快速、准确地反映真实的加工情况,优化了加工参数,减少了试验的工作量,为航空发动机蜂窝密封环的实际生产提供了理论依据。

## 参考文献

- [1] 何立东,高金吉,尹新. 蜂窝密封的封严特性研究. 机械工程学报, 2004, 40(6): 45-48.
- [2] 芦领,邹广平,曹扬,等. 钢质蜂窝夹芯梁高温疲劳试验及寿命预测研究. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(4): 439-444.
- [3] 芦领,邹广平,曹扬,等. 含初始缺陷的蜂窝夹芯板疲劳行为. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(3): 325-329.
- [4] 陈鲜莉. 蜂窝密封的应用. 化工设备与管道, 2009, 46(5): 28-32.
- [5] 刘建勇,杨大勇,王荣,等. 蜂窝密封件专用电火花加工机床研制. 航空制造技术, 2012(19): 47-50.
- [6] 黄志刚,郭钟宁. 单脉冲电火花加工温度场的有限元分析. 广东工业大学学报, 2002, 19(4): 38-43.
- [7] 刘斌,朱红月,张鲲,等. 数控高效蜂窝环磨削加工设备工艺. 电加工与模具, 2005(1): 45-47.
- [8] Shih H R, Shu K M. A study of electrical discharge grinding using a rotary disk electrode. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008(38): 59-67.
- [9] 贺达江,罗隆福,邵鹏飞,等. 接地电阻器温升实验及温度场仿真研究. 湖南大学学报, 2009, 36(9): 51-54.
- [10] 崔景芝,王振龙. 电火花加工过程中电极材料蚀除机理研究. 电加工与模具, 2006(6): 5-9.
- [11] 翟德梅,原红玲,段维峰. 基于正交试验的电火花加工工艺效果试验分析. 现代制造工程, 2004(7): 63-65.
- [12] Rebello J C, Dias A M, Kremer D, et al. Influence of EDM pulse energy on the surface integrity martensitic steels. Journal of Materials Processing Technology, 1988, 84: 90-96.

(责编 深蓝)