

工程陶瓷复杂回转表面的线切割加工 方法及表面粗糙度研究

杨兆军¹, 张立新^{1,2}, 王丽慧¹

(1. 吉林大学 机械科学与工程学院, 长春 130022; 2. 吉林工程技术师范学院 信息工程学院, 长春 130052)

摘 要: 提出了线切割加工导电工程陶瓷回转表面的新工艺. 对普通快速走丝线切割机进行了改造, 在机床上加装带动工件回转、并能传递加工电流的工件主轴装置, 实现了对工程陶瓷复杂回转表面的放电加工. 采用正交多项式回归设计对线切割放电加工碳化硼陶瓷回转表面的工艺参数进行优化, 得到了较低的表面粗糙度, 验证了线切割放电加工导电工程陶瓷回转表面新工艺的可行性.

关键词: 机械制造自动化; 工程陶瓷; 回转表面; 线切割加工; 表面粗糙度; 回归设计

中图分类号: TG 580.6

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2008)08-0800-06

0 引言

新型工程陶瓷材料具有优良的物理化学性能, 其耐高温、高速、高压, 热稳定和耐腐蚀性远优于普通金属材料, 因此, 在航空航天、机械工业和化学工业等领域具有广阔的应用前景. 但由于其硬度高、脆性大和烧结过程的变形, 难以进行切削加工和精密成型, 极大地限制了它的推广应用. 为解决这一难题, 近年来国内外诸多专家学者进行了工程陶瓷性能及加工方法的研究^[1-4], 如采用激光、电子束、等离子束和高压液体喷射等. 但这些方法迄今只能用于打孔和切割, 不能加工复杂表面.

放电加工(包括电火花成型和线切割加工)对工件材料的硬度和脆性不敏感, 适合于加工难切削的导电材料. 通常, 人们大多认为陶瓷属于绝缘材料. 其实, 新型工程陶瓷中有许多品种属于导电陶瓷或半导体陶瓷, 如 B_4C (碳化硼)、 TiN (氮化钛)、 ZrO_2 (二氧化锆)等. 对于不导电的工程陶瓷, 仅是由于增强、增韧等改性的需要而掺入了导电相, 客观上就具有了导电性或增强了导电性, 如 $Al_2O_3 + WC$ (三氧化二铝+碳化钨). 上述工程陶瓷具有一定的导电性, 因而具备了进行放电加工的可能性. 目前, 国内外均已有的在线切割机床上放电加工导电工程陶瓷的研究成果^[5-9]. 线切割加工是将工件固定在工作台上, 随工作台做平面运动, 因此只能加工直壁表面, 不能加工回转表面. 即使采用回转工作台或采用插补进给方式, 也只能加工轴向长度受机床极限切割厚度限制的短圆柱面或短圆锥面. 而回转表面是机械零件最主要的形状要素之一, 所以, 充分利用放电加工的优势, 探索工程陶瓷回转表面、特别是复杂回转表面的放电加工方法意义重大.

受砂带磨削加工原理的启发, 作者设想在线切割机工作台上加装一个工件主轴, 将工件装夹在主轴上, 随主轴旋转, 由线电极对导电陶瓷工件进行放电蚀除加工, 则具有加工出回转表面的可能; 又因为线电极不同于砂带, 其直径很小, 若加工中工作台做平面运动, 则线电极又可能像尖细的车刀一样加工出复杂回转表面. 这种成型原理与砂带磨削和车刀车削的区别在于将工件材料的去除机理由切削刃对工件的切削去除变成了线电极对工件的放电蚀除. 本文对基于线切割机的放电加工工程陶瓷回转表面的新方法进行验证, 并在此基础上对降低加工表面粗糙度的工艺参数进行了实验研究.

收稿日期: 2008-02-26.

基金项目: 吉林省科技发展计划资助项目(20050532).

作者简介: 杨兆军(1956-), 男, 吉林长春人, 教授, 博士生导师.

1 工件主轴系统的研制

本文使用的实验设备是 DK7725 数控线切割机床,其主要机械参数为:工作台行程 $X \times Y = 250 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$,进给脉冲当量为 0.001 mm ,电极丝直径为 $0.1 \sim 0.3 \text{ mm}$;其主要电气参数为:空载电压(峰值)为 $\text{DC}100\text{V}$,脉冲宽度为 $2 \sim 128 \mu\text{s}$,脉冲间隔比为 $1 \sim 10$,短路峰值电流为: $4 \sim 60 \text{ A}$ 。研制工件主轴系统的目的是使线切割机实现回转表面的放电加工,为此应满足 3 点要求:①能夹持工件进行回转运动;②主轴转速应在一定范围内可调,以适应不同工艺内容的需求;③能将加工电流传送到工件上去。

图 1 是机床整体布局示意图,其中工件主轴装置安装在线切割机的工作台上,工件安装在主轴夹头上,加工过程中工件旋转,并由工作台的移动实现轴向进给运动,由电极丝对工件外圆进行放电加工。

图 2 是工件主轴装置的三维效果图。工件主轴系统由主轴(含工件夹头)、减速器、电机和控制电源组成。工件主轴系统的工作原理是:由直流调速电机轴输出的动力和运动,经行星齿轮减速器减速后传给皮带传动轴,经一级皮带变速传给主轴。主轴的设计转速为 $20 \sim 120 \text{ r/min}$,由电机调速器实现无级调速。因主轴转速不高,故主轴采用了滑动轴承,以进一步提高主轴回转的平稳性。由图 2 可以看出,主轴装置的底板、轴承座、轴承、主轴及其工件夹头均为导体,可以将工作台上的加工电流传递到工件上去,但为了更加可靠地传递较大的加工电流,在主轴尾端加装了电刷。为了防止加工中电极丝抖动影响加工质量,在电极丝架上加装了一个限制电极丝径向位移的防抖装置。

用加装了工件主轴的线切割机对维氏硬度 HV 为 6000 、直径为 9 mm 的 B4C 毛坯进行了复杂回转表面的加工实验。采用脉冲宽度为 $4 \mu\text{s}$ 、峰值电流为 7 A 、主轴回转速度为 120 r/min 进行加工,结果加工出图 3 所示的直径误差不大于 0.01 mm 的复杂回转表面,表明在线切割机上加装了本文研制的工件主轴系统后能实现对导电工程陶瓷回转表面的加工。

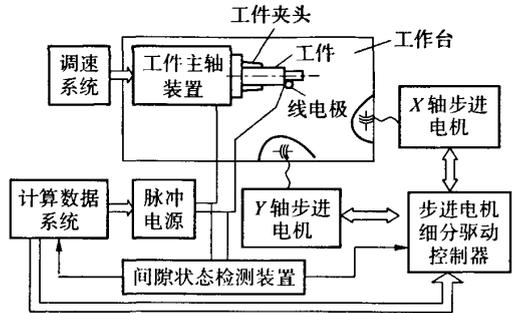


图 1 机床的整体布局示意图
Fig. 1 The figure of integral machine tool

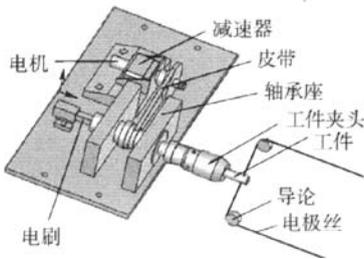


图 2 主轴回转装置三维效果图
Fig.2 3-D diagram of spindle system

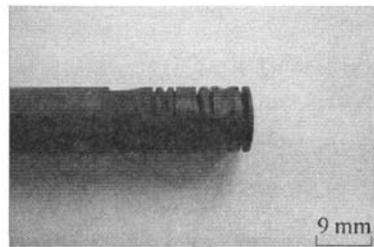


图 3 复杂回转表面异形件
Fig.3 The deformed parts of complicated rotary surface

在实验中发现,加工后的工件在形状和尺寸上虽然达到了一定的精度,但表面粗糙度反而较毛坯的烧结表面有所上升,而且粗糙度与加工参数关系密切,并具有非线性,为了提高表面加工质量,本文进一步研究了加工参数对表面粗糙度的影响规律。

2 表面粗糙度的回归实验

表面粗糙度的回归试验采用与上一节中相同的设备. 加工中, 影响表面粗糙度的因素主要是短路峰值电流、脉冲宽度和工件主轴的回转速度. 本文选择上述 3 个参数作为实验因素变量, 其他实验条件及工件与上一节中的实验相同.

2.1 方案设计及实验

本文采用正交多项式回归设计来确定实验方案. 这种设计方法不但能简化计算, 消除回归系数间的相关性, 而且可求得需要考察的任意次交互项的回归系数. 多元正交多项式回归设计是由各个单元正交多项式按正交原则组合而成的设计, 要求同一因素的水平间隔必须相等, 属于饱和设计. 本实验各因素取至二次多项式并考虑一级交互作用即可满足实验要求, 不必考虑更高次项及其

表 1 试验因素、水平表

Table 1 Table of test factors and levels

水平	因素		
	z_1/A	$z_2/\mu s$	$z_3/(r \cdot \min^{-1})$
1	16	2	60
2	20	33	90
3	24	64	120

交互作用, 因素不宜取多水平. 本文以 R_a 为实验指标, 短路峰值电流 z_1 、脉冲宽度 z_2 和工件主轴回转速度 z_3 为因素, 各因素的水平均取 3 水平, 因素、水平见表 1. 为使同一因素的水平间隔相等, 取脉宽 32 μs (近似为 33 μs). 则因素 z_i ($i=1, 2, 3$) 的水平均值 \bar{z}_i 和水平间隔 Δ_i 为

$$\bar{z}_i = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 z_{ij} \quad (1)$$

$$\Delta_i = z_{i(j+1)} - z_{ij} \quad (2)$$

式中 z_{ij} ($j=1, 2, 3$) 为因素 i 对应水平 j 的值, 结合表 1 及式(1)和式(2), 各因素的水平均值为

$$\bar{z}_1 = (16 + 20 + 24)/3 = 20$$

$$\bar{z}_2 = (2 + 33 + 64)/3 = 33$$

$$\bar{z}_3 = (60 + 90 + 120)/3 = 90$$

各因素的水平间隔为

$$\Delta_1 = 4; \Delta_2 = 31; \Delta_3 = 30$$

对 P 因素试验, 利用正交多项式回归设计, 可求得实验指标 R_a 估计值的回归方程的表达形式为^[10]

$$\hat{R}_a = b_0 + \sum_{j=1}^p \sum_{\alpha=1}^{d_j-1} b_{\alpha j} x_{\alpha}(z_j) + \sum_{h,j} b_{jh}^{(\alpha\beta)} x_{\alpha}(z_j) x_{\beta}(z_h) \quad (h, j = 1, 2, \dots, p; \alpha = 1, 2, \dots, d_j - 1; \beta = 1, 2, \dots, d_h - 1) \quad (3)$$

式中 d_h 为因素 z_h 的水平数; d_j 为因素 z_j 的水平数; $x_{\alpha}(z_j)$ 为因素 z_j 的第 α 次项; $x_{\beta}(z_h)$ 为因素 z_h 的第 β 次项; b_0 为常数项; $b_{\alpha j}$ 为 $x_{\alpha}(z_j)$ 的待估计系数; $b_{jh}^{(\alpha\beta)}$ 为 $x_{\alpha}(z_j)$ 和 $x_{\beta}(z_h)$ 交互项的待估计系数.

这里考虑到三因素之间交互作用的影响, R_a 回归方程化为

$$\hat{R}_a = b_0 + b_{11}x_1(z_1) + b_{21}x_2(z_1) + b_{12}x_1(z_2) + b_{22}x_2(z_2) + b_{13}x_1(z_3) + b_{23}x_2(z_3) + b_{12}^{(11)}x_1(z_1)x_1(z_2) + b_{13}^{(11)}x_1(z_1)x_1(z_3) + b_{23}^{(11)}x_1(z_2)x_1(z_3) + b_{12}^{(22)}x_2(z_1)x_2(z_2) + b_{13}^{(22)}x_3(z_1)x_2(z_3) + b_{23}^{(22)}x_2(z_2)x_2(z_3) \quad (4)$$

式中,

$$x_1(z_1) = \psi_1(z_1) = \frac{z_1 - \bar{z}_1}{\Delta_1} = \frac{1}{4}(z_1 - 20) \quad (5)$$

$$x_2(z_1) = 3\psi_2(z_1) = 3 \left[\left(\frac{z_1 - \bar{z}_1}{\Delta_1} \right)^2 - \frac{N^2 - 1}{12} \right] = \frac{3}{16}(z_1 - 20)^2 - 2 \quad (6)$$

$$x_1(z_2) = \psi_1(z_2) = \frac{z_2 - \bar{z}_2}{\Delta_2} = \frac{1}{31}(z_2 - 33) \tag{7}$$

$$x_2(z_2) = 3\psi_2(z_2) = 3 \left[\left(\frac{z_2 - \bar{z}_2}{\Delta_2} \right)^2 - \frac{N^2 - 1}{12} \right] = \frac{3}{961}(z_2 - 33)^2 - 2 \tag{8}$$

$$x_1(z_3) = \psi_1(z_3) = \frac{z_3 - \bar{z}_3}{\Delta_3} = \frac{1}{30}(z_3 - 90) \tag{9}$$

$$x_2(z_3) = 3\psi_2(z_3) = 3 \left[\left(\frac{z_3 - \bar{z}_3}{\Delta_3} \right)^2 - \frac{N^2 - 1}{12} \right] = \frac{1}{300}(z_3 - 90)^2 - 2 \tag{10}$$

式中, $\psi_x(z)$ ($x=0, 1, 2$) 为正交多项式组; N 为水平数。

2.2 回归计算及检验

按正交多项式回归设计的实验规则设计实验方案, 进行线切割实验, 用 SRM-1(D) 型表面粗糙度测量仪测量实验结果的 R_a , 其实验方案及 R_a 值列于表 2。回归分析在表 3 中进行, 包括回归系数计算、回归系数检验、回归方程检验和失拟检验等 4 个计算和检验过程。

由表 3 表面粗糙度回归分析表得出, 显著性水平为 0.05, 方程置信度为 95% 的最优回归方程为

$$\begin{aligned} \hat{R}_a = & 2.240 + 0.079x_1(z_1) + 0.085x_2(z_1) + 0.698x_1(z_2) - 0.081x_2(z_2) + \\ & 0.122x_1(z_3) - 0.02x_2(z_1)x_2(z_2) \end{aligned} \tag{11}$$

把式(5)~式(9)代入式(11)整理后得出表面粗糙度的三元多项式回归方程为

$$\begin{aligned} \hat{R}_a = & 4.091 - 0.336z_1 + 0.009z_1^2 + 0.471z_2 - 0.00675z_2^2 - 0.044z_1z_2 + 0.004z_3 - \\ & 0.001z_1^2z_2 + 0.0175z_1z_2^2 \end{aligned} \tag{12}$$

利用 matlab 优化模块(12)计算回归方程, 得到粗糙度最小值为 1.134 μm , 与之相对应的最佳工艺参数为: $z_1 = 18.937$; $z_2 = 2.129$; $z_3 = 60$ 。因机床控制系统在工艺参数的设置上只能取为整数, 故靠近取整最佳工艺参数为: $z_1 = 20$; $z_2 = 2$; $z_3 = 60$ 。

表 2 试验方案及计算格式表

Table 2 The experimental scheme and calculation scheme

编号	z_1	z_2	z_3	ψ_0	$x_1(z_1)$	$x_2(z_1)$	$x_1(z_2)$	$x_2(z_2)$	$x_1(z_3)$	$x_2(z_3)$	$x_1(z_1) \times$	$x_1(z_1) \times$	$x_1(z_2) \times$	$x_2(z_1) \times$	$x_2(z_1) \times$	$x_2(z_2) \times$	$R_a/\mu\text{m}$
											$x_1(z_2)$	$x_1(z_3)$	$x_1(z_3)$	$x_2(z_2)$	$x_2(z_3)$	$x_2(z_3)$	
1	16	2	60	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1.389
2	16	2	90	1	-1	1	-1	1	0	-2	1	0	0	1	-2	-2	1.418
3	16	2	120	1	-1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1.699
4	16	33	60	1	-1	1	0	-2	-1	1	0	1	0	-2	1	-2	2.225
5	16	33	90	1	-1	1	0	-2	0	-2	0	0	0	-2	-2	4	2.364
6	16	33	120	1	-1	1	0	-2	1	1	0	-1	0	-2	1	-2	2.498
7	16	64	60	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	2.798
8	16	64	90	1	-1	1	1	1	0	-2	-1	0	0	1	-2	-2	2.833
9	16	64	120	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	3.002
10	20	2	60	1	0	-2	-1	1	-1	1	0	0	1	-2	-2	1	1.236
11	20	2	90	1	0	-2	-1	1	0	-2	0	0	0	-2	4	-2	1.319
12	20	2	120	1	0	-2	-1	1	1	1	0	0	-1	-2	-2	1	1.381
13	20	33	60	1	0	-2	0	-2	-1	1	0	0	0	4	-2	-2	1.913
14	20	33	90	1	0	-2	0	-2	0	-2	0	0	0	4	4	4	2.237

续表 2

编号	z_1	z_2	z_3	ϕ_0	$x_1(z_1)$	$x_2(z_1)$	$x_1(z_2)$	$x_2(z_2)$	$x_1(z_3)$	$x_2(z_3)$	$x_1(z_1) \times x_1(z_1)$		$x_1(z_2) \times x_2(z_1)$		$x_2(z_1) \times x_2(z_2)$		$R_a/\mu\text{m}$
											$x_1(z_2)$	$x_1(z_3)$	$x_1(z_3)$	$x_2(z_2)$	$x_2(z_3)$	$x_2(z_3)$	
15	20	33	120	1	0	-2	0	-2	1	1	0	0	0	4	-2	-2	2.299
16	20	64	60	1	0	-2	1	1	-1	1	0	0	-1	-2	-2	1	2.698
17	20	64	90	1	0	-2	1	1	0	-2	0	0	0	-2	4	-2	2.713
18	20	64	120	1	0	-2	1	1	1	1	0	0	1	-2	-2	1	2.821
19	24	2	60	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1.411
20	24	2	90	1	1	1	-1	1	0	-2	-1	0	0	1	-2	-2	1.563
21	24	2	120	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	1.732
22	24	33	60	1	1	1	0	-2	-1	1	0	-1	0	-2	1	-2	2.616
23	24	33	90	1	1	1	0	-2	0	-2	0	0	0	-2	-2	4	2.674
24	24	33	120	1	1	1	0	-2	1	1	0	1	0	-2	1	-2	2.789
25	24	64	60	1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	2.851
26	24	64	90	1	1	1	1	1	0	-2	1	0	0	1	-2	-2	2.902
27	24	64	120	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3.108

表 3 表面粗糙度回归分析表

Table 3 The figure of surface roughness regression analysis

参数	项目	ϕ_0	$x_1(z_1)$	$x_2(z_1)$	$x_1(z_2)$	$x_2(z_2)$	$x_1(z_3)$	$x_2(z_3)$	$x_1(z_1) \times x_1(z_1)$		$x_1(z_2) \times x_2(z_1)$		$x_2(z_1) \times x_2(z_2)$		$x_2(z_2) \times x_2(z_3)$
									$x_1(z_2)$	$x_1(z_3)$	$x_1(z_3)$	$x_2(z_2)$	$x_2(z_3)$	$x_2(z_3)$	
D_i	27	18	54	18	54	18	54	12	12	12	108	108	108		
B_j	60.489	1.429	4.611	12.564	-4.383	2.192	0.424	0.028	-0.036	-0.192	-2.176	0.990	-1.10		
b_j	2.240	0.079	0.085	0.698	-0.081	0.122	0.008	0.002	-0.003	-0.016	-0.027	0.009	-0.01		
s_i		0.113	0.392	8.767	0.350	0.267	0.003	0.000056	0.00009	0.002	0.043	0.009	0.011		
F_j		62.78	217.78	4870.6	197.21	148.3	1.67	0.03	0.05	1.11	23.89	5.00	6.11		
显著性	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0			
		$S=10.10; f=26$				$S_e=0.0036; f_e=2$				$S_h=9.952; f_h=6$				$S_r=0.148; f_r=20$	
		$F_h=151.29; F_{0.05}(6,20)=2.60$				$F_H=1.1214; F_{0.25}(6,2)=3.31$				$F_{0.05}(1,2)=18.51$					

表 3 中, D_j 为 $x_a(z_j)$ 的平方和; B_j 为 $x_a(z_j)$ 与对应 R_a 乘积求和; b_j 为回归系数; S_j 是各因素及其交互作用的平方和; F_j 为回归系数检验的统计量; S 是总偏差平方和, f 是其自由度; S_e, f_e 是为了估计实验误差进行失拟检验计算得到的误差偏差平方和和自由度; S_h 为回归平方和, 即剔除不显著项, $F_j < F_{0.05}(1, 2) = 18.51$ 的项后, 剩余各项对应的 S_j 相加, 其剩余项的个数即为 S_h 的自由度 f_h ; S_r 与 f_r 为剩余平方和及其自由度; F_h 为回归方程检验的统计量; F_H 为失拟检验的统计量

3 实验验证

采用前面求出的最优回归参数(其他实验条件不变)进行加工实验, 共加工出 5 个试件, 其值分别为 0.968、1.099、1.241、1.326、1.331 μm , 其平均值为 1.193 μm , 图 4 是用 JSM-5310 扫描电镜放大 1000 倍的工件表面。图 5 则是采用本文实验因素值的中间值 ($z_1 = 20; z_2 = 33; z_3 = 90$) 所做对比实验的工件表

面,用扫描电镜放大 1 000 倍照片. 后者 $R_a=2.237 \mu\text{m}$, 表面形貌粗于前者.

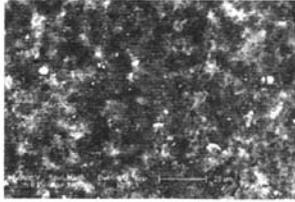


图 4 参数优化后加工图

Fig. 4 The processing map after parameter optimization

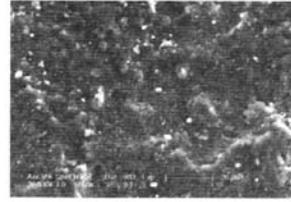


图 5 参数优化前加工图

Fig. 5 The processing map before parameter optimization

4 结论

1) 在线切割机上加装工件主轴系统, 能实现对导电工程陶瓷复杂回转表面的放电加工.

2) 线切割放电加工工程陶瓷回转表面的粗糙度与放电脉冲峰值电流、脉冲宽度和主轴回转速度相关, 且呈非线性关系. 通过多项式回归设计的优化实验可以得到在本实验条件下的最佳加工参数.

3) 本文提出的基于线切割机的导电工程陶瓷复杂回转表面的加工方法, 探索了一条解决陶瓷回转表面加工难题的途径, 同时也拓展了线切割机床的工艺范围.

参考文献:

- [1] 宋玉泉, 徐进, 胡萍, 等. 结构陶瓷的超塑性[J]. 吉林大学学报(工学版), 2005, 35(3): 225-242.
SONG Yu-quan, XU Jin, HU Ping, et al. Superplasticity of structural ceramics[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2005, 35(3): 225-242. (in Chinese)
- [2] GAO Chang-shui, LIU Zheng-xun. A study of ultrasonically aided micro-electrical-discharge machining by the application of workpiece vibration[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 139(1~3): 226-228.
- [3] MOHAN B, RAJADURAI A, TYANARAYANA K G. Electric discharge machining of Al-SiC metal matrix composites using rotary tube electrode[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 153: 978-985.
- [4] WENG Feng-tsai, SHYU R F, HSU Chen-siang, Fabrication of micro-electrodes by multi-EDM grinding process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140(1~3): 332-334.
- [5] TAKAYUKI T, YASUSHI F, NAOTAKE M, et al. Machining phenomena in WEDM of insulating ceramics[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149(1~3): 124-128.
- [6] JERZY K, KAMLAKAR P. RAJURKAR N C. Machining of low electrical conductive materials by wier electrical discharge machining (WEDM)[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149(1~3): 266-271.
- [7] KONIG W, AACHEN R, DAUW D F. EDM-Future Steps Towards the Machining of Ceramics[J]. Annals of the CIRP, 1998, 37(2): 623 - 631.
- [8] MASUZAWA T. Three-dimensional micro-machining by machine tools[J]. Annals of the CIRP, 1997, 46(2): 621-628.
- [9] 杜建华, 刘永红, 李小朋, 等. 工程陶瓷材料磨削加工技术[J]. 机械工程材料, 2005, 29(3): 1-3.
DU Jian-hua, LIU Yong-hong, LI Xiao-peng, et al. The grinding technology of engineering ceramics[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2005, 29(3): 1-3. (in Chinese)
- [10] 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 吉林: 吉林科学技术出版社, 2001: 198-206.

University, 1998, 13(1): 73-75. (in Chinese)

[9] 苏海花, 张杰, 徐风军. 传递矩阵法求解超静定连续梁[J]. 江苏广播电视大学学报, 2004, 15(6): 17-19, 52-53.

SU Hai-hua, ZHANG Jie, XU Feng-jun. Transfer matrix method indeterminate continuous beam[J]. Journal of Jiangsu Radio & Television University, 2004, 15(6): 17-19, 52-53. (in Chinese)

Inner Force Calculation of Continuous Beam Based on Transfer Matrix Method

QIAO Ai-ke¹, SUN Hong-peng², GAO Si³, ZHAO Liang³, LIU Bao-hua³

(1. College of Life Science and Bioengineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. Babcock & Wilcox Beijing Co., Ltd., Beijing 100043, China; 3. College of Mechanical Engineering and Applied Electronic Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: In order to carry out mechanical analysis of continuous beams, the transfer matrix method improved from the matrix displacement method was presented. Finite element method was employed to discretize the continuous beams so as to obtain the displacement vector, force vector and cell rigidity matrix. Transfer matrix method was employed to determine the transfer relation of the poles in the beam. The displacements and inner forces at crunodes can be solved based on given boundary conditions. A practical calculation project of the continuous beams was demonstrated which can verify the validity of the presented method. This method can simplify the calculation greatly and is more suitable for the inner force calculation of continuous beams by using computer.

Key words: finite element method; transfer function matrices; continuous beam

(责任编辑 梁洁)

(上接第 805 页)

Research on WEDM Method of Engineering Ceramic Complex Rotary Surface and Surface Roughness

YANG Zhao-jun¹, ZHANG Li-xin^{1,2}, WANG Li-hui¹

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

2. College of information Engineering, Jilin Teachers Institute of Engineering and Technology, Changchun 130052, China)

Abstract: A novel technology of wire electro-discharge machining (WEDM) rotary surface of engineering ceramic is presented in this paper. The common high-speed WEDM is advanced, and the current can be transmitted by the workpiece spindle machining device to achieve the complexity of the engineering ceramic rotary surface. The process parameters of WEDM boron carbide ceramic rotary surface are optimized by orthogonal polynomial regression design, and the lower surface roughness and the feasibility of new technology that WEDM conductive ceramic rotary surface is further validated.

Key words: mechanical manufacture and automation; engineering ceramic; rotary surface; WEDM; surface roughness; regression design

(责任编辑 苗艳玲)