

管电极微细电火花铣削加工

迟关心¹,褚旭阳²,狄士春¹,王振龙¹

(1.哈尔滨工业大学 机电工程学院,哈尔滨 150002;2.厦门大学 物理与机电工程学院,厦门 361005)

摘要:提出了采用对轴向损耗不敏感的微细管电极进行微细电火花分层铣削的加工方法,并对管电极在加工过程中的损耗特性进行了理论分析。在此基础上,分别采用铜管电极和实心电极进行了微细电火花铣削加工实验。结果表明:采用中空结构的管电极不仅减小了铣削过程中电极端部的损耗半径,提高了加工精度,而且简化了微细电火花铣削的分层策略和电极损耗补偿策略。

关键词:材料合成与加工工艺;微细电火花;铣削;管电极

中图分类号:TG661 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2011)Sup.1-0121-06

Micro-EDM milling with tube electrode

CHI Guan-xin¹, CHU Xu-yang², DI Shi-chun¹, WANG Zhen-long¹

(1. Department of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Department of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The axial wear-loss insensitive tube electrodes was applied to substitute solid electrodes during micro-EDM milling process, and the tube electrode wear-loss characteristics during this processing was analyzed. The comparative experiments using both copper tube electrodes and solid electrodes were carried out on the convention micro-EDM milling system. Results indicate that tube electrode reduces wear-loss radius of the electrode end, improves machining accuracy, and simplifies the compensation method in micro-EDM milling process.

Key words: materials synthesis and processing technology; micro-EDM; milling; tube electrode

0 引言

微细电火花铣削加工^[1]采用简单形状的电极,按照类似于机械铣削的成型运动,通过火花放电来蚀除多余材料,获得所需的零件形状。该技术具有工具电极简单、工具与工件之间无宏观作用力等特点,可实现微细复杂三维结构的加工。国内外学者利用开发出的微细电火花加工装置,相继制造出了微小球冠^[2]、微型涡轮盘^[3]、微型齿

轮^[4]、微传感器^[5]等具有复杂结构的微三维零件。同时,微细电火花加工具有非接触式的特点,使其在硬质合金、镍合金及钛合金等难加工材料的加工上具有独特的优势^[6]。目前,微细电火花铣削加工在微机械、微型模具制造等领域取得了广泛的应用,成为一种不可或缺的微细加工技术。

目前,微细电火花铣削加工技术也存在着一一定的问题。相比于常规的电火花加工,微细电火花加工中放电间隙较小,加工条件较恶劣,微细工

收稿日期:2010-04-16.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50835002).

作者简介:迟关心(1968-),男,副教授.研究方向:电火花加工.E-mail:chigx@hit.edu.cn

通信作者:褚旭阳(1981-),男,讲师.研究方向:微细电火花加工.E-mail:chuxuyang7@126.com

具在加工过程中极易损耗。电极端部的尖角、棱边处的损耗,将直接影响到微细电火花铣削的加工精度。虽然,许多学者通过使用直径更小的微细工具^[4]、规划更复杂的铣削路径^[7]以及采取多种电极损耗补偿策略^[6,8-9]等方法来提高铣削精度,但是依然无法避免电极损耗对加工精度的影响。更为重要的是,这些方法都是以牺牲铣削效率和增加铣削系统复杂性为代价的,限制了微细电火花铣削加工技术在微小零件加工中的进一步应用。因此,如何降低电极损耗对加工精度及加工效率的影响,一直是微细电火花加工技术需要解决的问题。本文将对微细电火花铣削中电极的损耗问题进行研究,以寻求更为有效的提高铣削精度和效率的方法。

1 微细电极的损耗

1.1 电极损耗对铣削精度的影响

微细电火花铣削通常采用分层去除的方式进行,如图 1 所示。为了提高铣削精度,工件的分层厚度通常取值较小(1~4 μm),使工具电极在加工完每一层后,端部可以自动恢复平整,实现所谓的“等损耗加工”。事实上,在微细电火花分层铣削过程中出现电极等损耗的条件较为苛刻,还受到其他条件的制约。

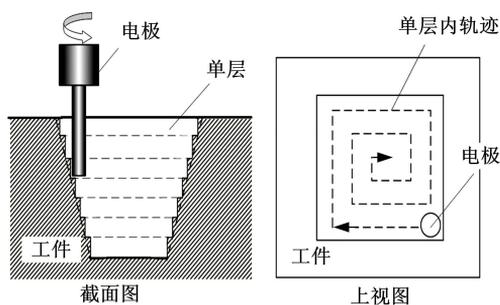


图 1 电火花分层铣削示意图

Fig.1 Diagram of layered milling in micro-EDM

首先,铣削中电极轨迹需要合理的规划才能保证层与层之间电极的等损耗^[7]。这是由于在加工轮廓的侧壁时,轮廓面的存在使得电极底面的棱边处产生较大的导钝圆角,即使采用旋转的圆柱形电极,这种现象也不能避免。因此,为获得高精度的加工表面,需要对电极轨迹进行合理规划,使电极在加工轮廓边缘时产生的导钝现象在层面中央部位加工时予以消除,以保持进入下一层加工面时,电极具有平整的端面。

其次,在每一层加工面内电极也并非均匀损

耗。图 2 所示为等损耗加工中电极端部形状的变化情况。在加工初始阶段,由于尖端放电的作用,电极底面的锐边处首先出现导钝现象,随着扫描运动的继续,放电间隙逐渐拉大,放电点逐渐减少并发生在极间距离最近处,导钝圆角将逐渐减小直到消失,进而恢复电极的理想形状。上述过程表明,在分层铣削过程中,电极端部的形状并非一直保持平整,而是经历着“平整—导钝—平整”的周期性变化。在周期内部,电极实际上一直处于尖端磨损的状态,这对高精度的微细加工极为不利。

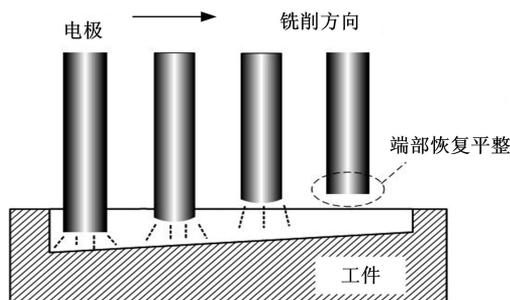


图 2 电极平时端部的损耗过程

Fig.2 Wear process of electrode end

从上面的分析可以看出,在微细电火花铣削过程中,电极的损耗,特别是电极端部形状的改变是影响铣削精度的一个重要原因。尽管采用了等损耗的加工策略,加工过程中电极端部也很难一直保持平整状态。

1.2 管电极的损耗特性

减小加工过程中电极端部的损耗可通过两个途径来实现:①采用低损耗的加工条件,减少电极材料在加工中的剥落速度;②使用一些对损耗不敏感的结构,以达到减小加工误差,提高加工精度的目的。具有中空结构的管状电极恰恰具备了这种特性。

管电极作为电火花加工工具由来已久,其首先在电火花小孔加工中使用。通过向管电极中通入高压工作液,电火花小孔加工可制作出深径比为 100 的小孔。近年来,管电极被越来越多的应用于电火花铣削加工中,管电极中喷出的工作液的类型也扩展为煤油^[10]、空气^[11]、水雾^[12-13]等多种绝缘介质。但是,这些管电极铣削均应用在粗加工场合,加工电流在 10 A 以上,管电极的直径也都大于 5 mm。管电极在加工过程中只起到了强迫冲液的作用,其主要以获得较高的铣削速度为主要目的,而非提高加工精度。事实上,管电极

还具有对损耗不敏感的结构,有助于对提高微细电火花铣削加工精度。

图 3 所示为理论上相同直径的实心电极和管电极在电火花加工中电极端面所能产生的最大损耗。其中 D 为电极外径; t 为管电极厚度; L 为加工深度; R_s 、 R_t 分别为实心电极和管电极在加工中产生的最大端部损耗半径值; α_s 、 α_t 分别为实心电极和管电极沿轴线方向所能产生的最大锥角值。根据相应的几何关系,对实心电极有: $R_s = D/2$, $\alpha_s = \arctan(D/(2L))$;对管电极有: $R_t = t$, $\alpha_t = \arctan(t/L)$ 。可见,在相同的外径下,管电极在铣削过程中端部的最大损耗半径和轴向最大损耗锥角均小于实心电极。其损耗值主要由管壁厚度来决定,而不像实心电极那样与整个轴的半径有关。在电火花铣削加工过程中,当管电极外部的电极材料损耗到一定程度后,中空的结构会使损耗表现在轴向长度上,而避免了径向误差的增加。这样保证了加工中的电极具有较小的端部损耗半径和锥度,减小了工件上的残留误差。因此,与实心电极相比,管电极在铣削过程中电极端部产生的变化更小,理论上可以获得较小的加工误差。

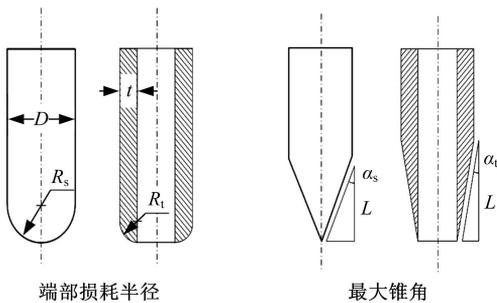


图 3 管电极与实心电极损耗的比较

Fig.3 Wear comparison between tube and solid electrodes

2 管电极微细电火花铣削实验

为验证管电极的损耗特性,研究管电极在微细电火花分层铣削中的加工效果,本文将对管电极微细电火花铣削进行相关的实验研究。

实验装置采用哈尔滨工业大学自行研制的微细电火花加工机床。该装置具有三轴联动功能, Z 轴上安装有回转跳动小于 $1\ \mu\text{m}$ 的旋转主轴,转速在 $1000\sim 25000\ \text{r/min}$ 连续可调,可实现微细电火花铣削加工。铣削用电极为中空的铜管电极。在铣削过程中,主轴带动电极作高速旋转,并同时分层铣削运动,如图 4 所示。与其他管

电极电火花加工不同,在铣削过程中工作液并未从管电极中喷出,而是采取外部冲液的方式进行排屑,因此并没有增加铣削系统的复杂性。

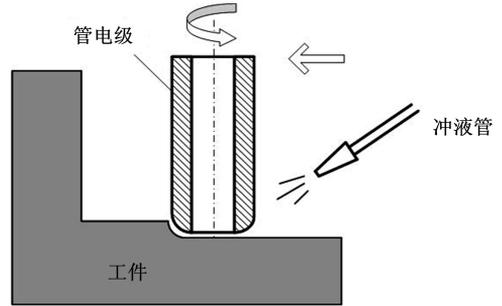


图 4 管电极与实心电极损耗的比较

Fig.4 Wear-loss comparison between tube and solid electrodes

2.1 铣削的分层厚度

为验证管电极铣削对分层厚度的影响,进行如下实验。分别采用直径 $100\ \mu\text{m}$ 的实心电极和外径 $300\ \mu\text{m}$ 、内径 $240\ \mu\text{m}$ 的管电极进行侧壁结构(直径 $200\ \mu\text{m}$ 、高 $250\ \mu\text{m}$ 的微轴)的铣削。实验条件如下:加工电压 $110\ \text{V}$,脉宽 $20\ \mu\text{s}$,占空比 50% ,主轴转速 $2000\ \text{r/min}$,铣削分层厚度 $10\ \mu\text{m}$,机床进给速度 $50\ \mu\text{m/s}$ 。铣削过后实心电极和管电极端部的扫描电镜图片如图 5 所示。可以看出,由于采用了较大的分层厚度连续进行侧壁结构的铣削,实心电极端部无法恢复平整,而且沿轴线方向存在锥度。相反,管电极在铣削过后仍然具有平整的端面,侧面的锥度也较小。端面外侧的最大圆角半径仅为 $22\ \mu\text{m}$,这大概相当于直径 $50\ \mu\text{m}$ 的实心电极所产生的圆角半径误差。

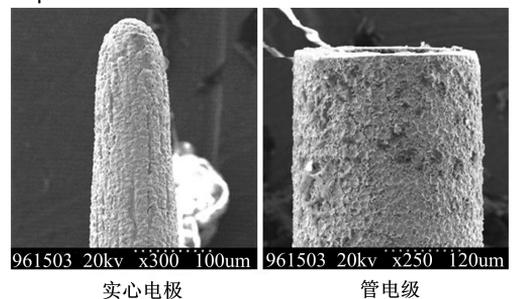
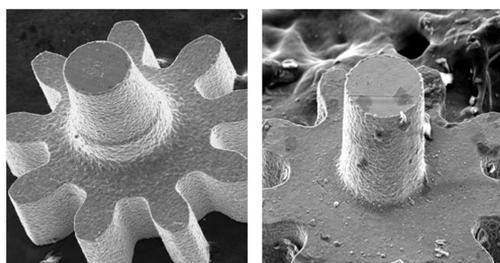


图 5 铣削加工后的实心电极和管电极端部形状

Fig.5 End shape of solid electrode and tube electrode after milling process

图 6 所示分别为实心电极和管电极铣削加工出的微轴。可以看出,实心电极加工出的微轴具有较大的圆角误差和锥度误差,加工精度较差。而采用管电极铣削的微轴底部圆角误差为 $29\ \mu\text{m}$,锥度误差大约为 1.2° ,加工精度相对较高。管电极在铣削中具有保持端面平整的能力,尽管

采用了较大的分层厚度,管电极铣削仍然可以获得较高的铣削精度。



实心电极铣削的微轴 管电极铣削的微轴

图 6 实心电极和管电极铣削效果对比

Fig.6 Milling performance of solid and tube electrodes

为进一步研究分层厚度对管电极端部损耗的影响规律,本文还进行了不同分层厚度(5~30 μm)的铣削试验,实验条件同上。实验结果如图 7 所示。当分层厚度较小时,铣削后管电极端部的圆角半径较小。而当分层厚度大于 10 μm 时,铣削后的管电极端部的圆角半径变化不大,保持在 20 μm 左右。可见,在实际加工过程中,管电极端部的损耗半径值要小于理论计算值。这可能是由于电火花加工中尖角的蚀除特性所造成的。

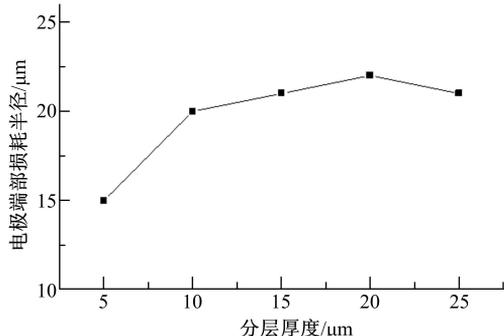


图 7 分层厚度对电极端部损耗半径的影响

Fig.7 Effect of layer thickness on wear-loss radius of electrode end

2.2 管电极的壁厚

管电极具有薄壁的结构,使其在微细电火花铣削加工中可保持一致的端部形状。为研究管壁厚度对管电极端部损耗的影响规律,本文进行了不同管壁厚度(10~30 μm)的铣削试验,利用这些管电极对同一窄槽进行铣削加工,加工后记录下铣削后管电极的损耗长度并测量管电极的端部损耗。试验中不同壁厚的管电极通过电火花磨削的方式来获得。实验条件如下:加工电压 110 V,脉宽 20 μs,占空比 50%,主轴转速 2000 r/min,

铣削分层厚度 10 μm,机床进给速度分别为 50 μm/s 和 100 μm/s。

由于管电极为中空结构,电极体积损耗率 θ 由下式计算:

$$\theta = V_e / V_w = \frac{\pi[(d_1/2)^2 - (d_2/2)^2] h_e}{\pi D^2 h_w} \quad (1)$$

式中: V_e 、 V_w 分别为电极和工件的蚀除体积; D 为型腔的直径; d_1 为管电极的外径; d_2 为管电极的内径; h_e 为管电极轴向损耗的长度; h_w 为型腔的深度。

图 8 所示为管壁厚度对电极损耗率和端部损耗半径的影响规律。可见,随着管电极壁厚的不断降低,电极端部的圆角半径不断减小,与前面的理论分析结果一致。但是,随着管壁厚的减小,电极损耗率也逐渐增加。这可能是由于薄壁零件的散热能力差导致的。由于管电极具有中空的结构,当壁厚减小到一定程度时,其截面面积明显变小,但管电极的外径变化不大,单位时间内扫过的面积并未显著减小,导致管电极在长度方向上损耗较快。因此,在实际加工过程中,要综合考虑加工精度和效率的要求,选取合适壁厚的管电极。

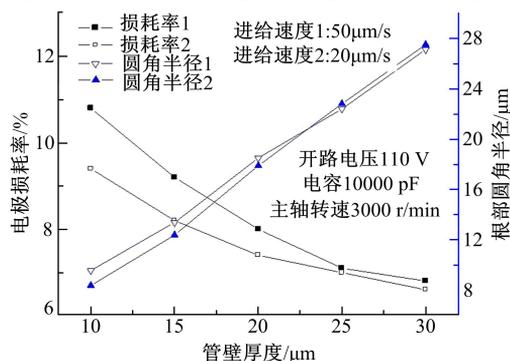


图 8 管壁厚度对加工性能的影响

Fig.8 Machining performance with different tube thickness

2.3 管电极铣削的加工效率

在实验中,管电极的铣削效率较实心电极有较大的提高。以铣削精度相近的直径 50 μm 实心电极和壁厚 30 μm、外径 300 μm 的管电极为例,在连续铣削侧壁结构时的最高蚀除效率分别为 $3.2 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{min}$ 和 $4.8 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{min}$ 。加工效率相差近 10 倍,这主要是由于以下几个原因造成的:

(1)管电极铣削可采用较大的分层厚度。对于铣削同一工件来说,分层厚度的增加意味着铣削层数及电极运动轨迹步数的减小。

(2)管电极铣削可减少电极在同一层内的轨迹步数。例如直径 $300\ \mu\text{m}$ 的管电极在相同行程内扫过的面积为直径 $50\ \mu\text{m}$ 实心电极的 36 倍。因此在每一层内,管电极所需的轨迹步数要远远小于实心电极。

(3)管电极可提高铣削的进给速度。由于管电极的管状结构,电极本身的刚度较高。相比于小直径的实心电极,管电极在铣削中可采用较高的进给速度,有助于提高加工速度。

(4)在相同的主轴转速下,由于管电极的外径较大,其在旋转时外缘的线速度较高,高速旋转产生的流体效应使蚀除产物得到及时排除,可获得稳定的放电状态,进一步提高了加工效率。

基于以上原因,在保持相同加工精度下,管电极加工可显著提高铣削效率。

3 管电极对铣削加工的影响

上述实验表明,管电极在微细电火花铣削过程中对分层厚度不敏感,电极的端部可以一直保持平整状态,有助于提高铣削精度和效率。同时,这些特点还对微细电火花铣削的分层策略、电极运动轨迹规划及加工表面修整等问题产生积极的影响。

3.1 分层策略

微细电火花分层铣削的优点在于将复杂三维实体的制造过程演化为简单二维层面的叠加,简化了加工过程。但是,微细电火花加工实体模型的分层厚度不仅与其本身结构有关,还需要满足等损耗条件。事实上,为提高加工精度,许多学者均采用电极端部放电的方法来进行分层铣削,限制了实体的分层厚度,降低了加工效率。然而,管电极铣削在加工中对分层厚度不敏感,使实体模型分层厚度的选择范围更加广泛。因此,在实际加工过程中可以根据零件的结构及加工要求,适当的增加分层厚度,提高铣削效率。

3.2 铣削路径的规划

管电极的使用有助于简化铣削路径。在 1.1 节的分析中曾指出,微细电极的端部在连续铣削侧壁时无法自动恢复平整,因此需要对电极轨迹进行特殊的规划,以满足等损耗条件。而管电极在铣削过程中端部可以一直保持平整,无需考虑电极端部的恢复问题,因此大大简化了铣削路径的规划问题,提高了微细电火花 CAM 系统的通用性。

另一方面,管电极的使用也有利于同一层面内铣削残留痕迹的消除。图 9 所示为分别采用实

心电极和管电极铣削时,两次走刀的残留痕迹的对比图。在使用实心电极铣削时,由于电极端部存在损耗,即使两次走刀轨迹相互重叠也很难消除残留的痕迹。而当使用管电极进行铣削时,电极端部一直处于平整状态,相邻两次走刀之间重叠的距离等于管电极的壁厚的 2 倍即可完全消除残留痕迹。因此,管电极的壁厚决定了铣削轨迹重合率的大小。

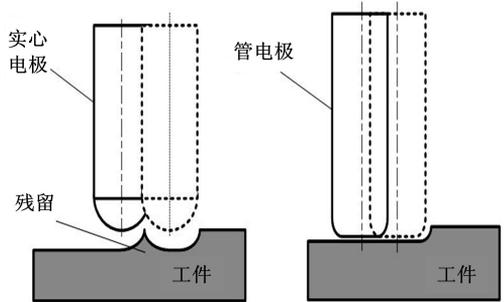


图 9 两次走刀间的残留痕迹

Fig. 9 Reamant between two milling traces

3.3 加工表面的修整

微细电火花分层铣削加工后,工件表面会产生大量的台阶残余,如图 10(a)所示。为去除这些残余台阶,可根据实体轮廓表面的 u 向和 v 向矢量,使用电极对轮廓表面进行修整,以提高工件的轮廓精度^[4],如图 10(b)所示。但是,在工件轮廓修整阶段,运动轨迹上各点的去除量不一致,使电极各部分损耗不均匀,无法实现等损耗状态,补偿较为困难。虽然可以使用片状电极将实心电极的底面定期“切平”,但是由于电极的尖角损耗较快,电极端部很难长时间内保持平整,修整精度很难提高。而当使用管电极对轮廓表面进行修整时,其底面可实时的保持平整,修整精度较高。同时,电极损耗后也不需要“切平”,直接在长度方向上进行补偿即可,提高了修整效率。

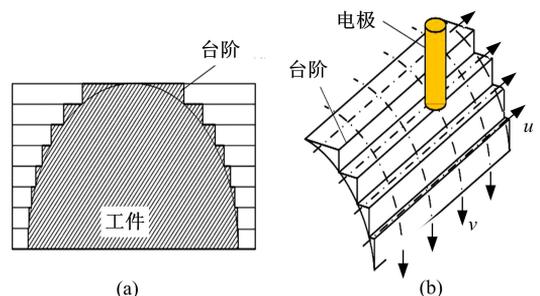


图 10 电火花铣削去除残余台阶示意图

Fig. 10 Diagram of stepped vestige removal in micro-EDM

4 结束语

管电极具有对电极损耗不敏感的结构,在微细电火花加工中具有保持端部平整的能力。在没有增加铣削系统复杂性的前提下,采用中空结构的管电极代替实心电极进行微细电火花铣削,不仅可以减小铣削过程中电极端部的损耗半径,提高加工精度,还有助于简化微细电火花铣削的分层策略和电极损耗补偿策略,提高加工表面修整精度和铣削效率。

参考文献:

- [1] Yu Zu-yuan. Three dimensional micro-EDM using simple electrodes[D]. Tokyo: University of Tokyo, 1997.
- [2] Yu Zu-yuan, Masuzawa Takahisa, Fujino Masatoshi. 3D Micro-EDM with simply shaped electrode[J]. Annals of the CIRP, 1997, 46(1): 1-8.
- [3] 张勇. 微细电火花加工系统及其工艺技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004: 48-77.
Zhang Yong. Research on a micro-edm system and its techniques [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2004: 48-77.
- [4] 李刚. 基于直线电机的微细电火花加工系统及其关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008: 67-80.
Li Gang. Research on micro EDM system based on linear motor and its key technologies [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008: 67-80.
- [5] Leuven University. [DB/OL]. [2010-04-23]. http://www.mech.kuleuven.ac.be/pma/research/mpe/default_en.p.html.
- [6] 董颖怀. 一种微型涡轮发动机的设计及其关键制造技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 60-87.
Dong Ying-huai. A study of key structures and fabrication technology of a micro turbine engine [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 60-87.
- [7] 王振龙. 微细电火花加工关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2000: 56-62.
Wang Zhen-long. Research on the key technologies of micro electro discharge machining [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2000: 56-62.
- [8] 李勇, 佟浩, 郁鼎文, 等. 三维微细电火花伺服扫描加工[J]. 纳米技术与精密工程, 2008, 6(4): 307-311.
Li Yong, Tong Hao, Yu Ding-wen, et al. Servo scanning process of 3D micro EDM [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2008, 6(4): 307-311.
- [9] Narasimhan Jayakumar, Yu Zu-yuan, Rajurkar Kamalakar P. Tool wear compensation and path generation in micro and macro EDM [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2005, 7(1): 75-82.
- [10] 孙德旭, 李文卓. 高效电火花铣削机床的探索研究[J]. 机械工程与自动化, 2007, 142(3): 135-139.
Sun De-xu, Li Wen-zhuo. Development of a high efficiency ED-milling machine tool [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2007, 142(3): 135-139.
- [11] 李立青, 赵万生, 狄士春, 等. 气体介质中电火花铣削加工工艺实验研究[J]. 南京理工大学学报, 2006, 30(1): 12-16.
Li Li-qing, Zhao Wan-sheng, Di Shi-chun, et al. Experimental study on dry ED-milling [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2006, 30(1): 12-16.
- [12] 李利, 顾琳, 夏永高, 等. 内喷雾式电火花铣削加工的实验研究[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(10): 1569-1572.
Li Li, Gu Lin, Xia Yong-gao, et al. Experimental study of mist-jetting electric discharge milling [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(10): 1569-1572.
- [13] 丁林松, 康小明, 赵万生. 液中喷气电火花铣削的加工性能实验研究[J]. 电加工与模具, 2009(4): 6-8.
Ding Lin-song, Kang Xiao-ming, Zhao Wan-sheng. Research on submersed gas-jetting electrical discharge milling [J]. Electromachining & Mould, 2009(4): 6-8.