

# 一种45钢表面电火花沉积WC层的新方法

郝越峰<sup>1</sup>, 曹明让<sup>2</sup>, 曹一龙<sup>2</sup>

(太原理工大学 机械工程学院, 太原 030024)

**摘要:** **目的** 提出一种利用高速电火花小孔加工机床实现工件表面强化的新方法。**方法** 基于电火花沉积理论,通过改变机床电极的极性,在45钢表面电火花沉积WC层,从沉积层的厚度、粗糙度和微观缺陷三个方面分析电流和脉宽对沉积层质量的影响。**结果** 当脉宽为80  $\mu\text{s}$ ,电流为7 A时,获得的沉积层厚为35  $\mu\text{m}$ ,硬度达1000HV,无明显缺陷。**结论** D703F高速电火花小孔加工机床更换极性后,能够进行表面沉积,适当调整工艺参数可以实现空气中放电沉积,并获得理想的沉积层。

**关键词:** 电火花小孔加工机床; WC合金; 电火花沉积

**中图分类号:** TG174.45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-3660(2014)04-0097-04

## A New Method of Depositing WC Alloying by EDM Technology on the Surface of 45 Steel

HAO Yue-feng<sup>1</sup>, CAO Ming-rang<sup>2</sup>, CAO Yi-long<sup>2</sup>

(College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**ABSTRACT:** **Objective** A new method of surface strengthening by ordinary high-speed Electrical Discharge Machining (EDM) hole processing tool was described. **Methods** Sediment layer reinforced by tungsten carbide on surface of 45 steel could be obtained based on the theory of electric spark deposition by changing the polarity in the air dielectric. This paper analyzed the influence of various process parameters on the sediment quality from three aspects of the roughness, thickness and micro sedimentary defects.

**Results** 7 A and 80  $\mu\text{s}$  pulse width was chosen to get the optimal sediments of comprehensive quality, its thickness could reach 35  $\mu\text{m}$  and its hardness was 1000HV without visible flaws in the sediment layer. **Conclusion** The D703F high-speed EDM hole processing tool could generate sediment layer through changing its polarity and get optimal sediments layer by appropriate adjustment of processing parameters.

**KEY WORDS:** EDM hole processing tool; WC alloying; EDM deposition

零件表面的局部损坏往往会导致整个机器或设备停用<sup>[1-3]</sup>。现代制造业对零件表面性能的要求越来越高,采用表面光整加工或表面渗金属等技术可以提高零件的表面性能。电火花表面沉积也叫电火花表面强化,是通过火花放电作用将作为电极的导电材

料熔渗进金属工件表层,形成微纳米级的合金表面强化层,从而使工件的物理、化学和机械性能得到改善<sup>[4-6]</sup>。将不同的电极材料熔渗到工件表面,可以得到所需的表面性能,并且沉积层与基体呈牢固的冶金结合,不易脱落。该技术能够达到昂贵的整体材料难

收稿日期: 2014-02-21; 修订日期: 2014-03-24

Received: 2014-02-21; Revised: 2014-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(51075294); 山西省自然科学基金(20090110029-3)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51075294); The Natural Science Foundation of Shanxi Province(20090110029-3)

作者简介: 郝越峰(1987—),男,河北人,硕士生,主要研究方向为特种加工。

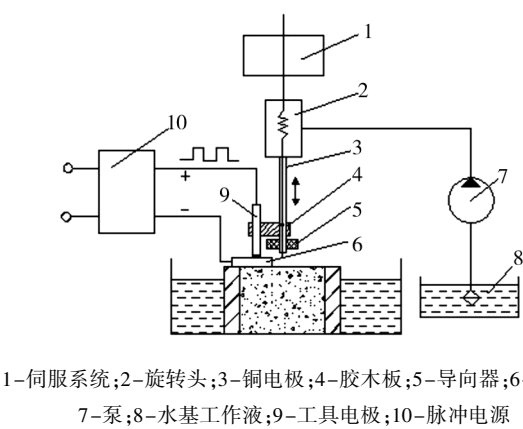
Biography: HAO Yue-feng(1987—), Male, from Hebei, Master student, Research focus: non-traditional machining.

以达到的效果<sup>[7]</sup>,不仅使机械产品的综合性能提高,而且降低了产品的制造成本,应用在发动机叶轮及刀具表面强化、模具量具表面修复和机器零件的微量修补等方面,可取得良好的经济效益<sup>[8-10]</sup>。随着人们对电火花强化机理研究的不断深入,该技术得到了进一步发展,但目前强化设备大多价格昂贵,加工效率较低,这在一定程度上限制了该技术在生产加工中的应用。文中采用改装后的 D703F 高速电火花小孔加工机床,在空气中进行表面 WC 沉积,并对 WC 沉积层的性能进行研究,旨在拓宽电火花沉积技术的应用范围。

1 实验

基体材料为 45 钢,沉积前用丙酮清洗干净<sup>[11]</sup>。电极材料选用 WC20,直径为 2.4 mm,其成分(以质量分数计)为:W 97.6% ~ 98%,CeO<sub>2</sub> 1.80% ~ 2.20%,其它杂质<0.20%。

沉积设备为国产 D703F 高速电火花小孔加工机床,将工件接电源负极,WC 电极作为工具电极接电源正极,并用绝缘胶木板将 WC 电极与铜电极相连接,从而使 WC 电极随铜电极做轴向的进给运动。沉积在空气中进行,原理如图 1 所示。主要的工艺参数包括输出电流档(电流强度)和输出脉宽档(脉冲宽度),电流档分为 1,2,⋯,6 档,脉宽档分为 1,2,⋯,5 档,实验中改变电流档和脉宽档,沉积面积为 0.4 cm<sup>2</sup>,沉积时间为 5 min。



1-伺服系统;2-旋转头;3-铜电极;4-胶木板;5-导向器;6-工件;  
7-泵;8-水基工作液;9-工具电极;10-脉冲电源

图 1 电火花小孔加工机床沉积原理示意

Fig. 1 The sedimentary process principle by EDM small hole processing tool

采用 JSM-6700F 场发射扫描电子显微镜观察沉积层表面形貌及其与基体交界处的组织结构,用千分表测量沉积层厚度,用 TR200 手持式粗糙度仪测量沉

积层表面粗糙度。

2 结果及分析

2.1 工艺参数对加工稳定性的影响

从表 1 可以看出,在改变极性的 D703F 高速小孔加工机床上进行电火花沉积,在有的电规准下不能进行稳定加工,出现加工不稳定或者短路的情况。随着电流档的增大,与之匹配使用的脉宽档也增大。这是因为正离子质量大,惯性大,时间极短的小脉宽(几十微秒)不利于正离子撞击到工件表面<sup>[12-14]</sup>,不利于负极性加工。另外,电流档越大,放电通道中的离子密度越大,这将使通道内高速运动的离子和电子碰撞更加剧烈,使得带电离子偏离电力线而发生散射的作用越强<sup>[15]</sup>,不利于加工。故加工时,大电流档应该匹配使用大的脉宽档,加工中发生不稳定或者短路的情况与脉宽及脉宽与电流的匹配有关。

表 1 电火花沉积加工稳定性  
Tab. 1 The processing stability of EDM deposition

脉宽档	加工状态					
	电流 1 档	电流 2 档	电流 3 档	电流 4 档	电流 5 档	电流 6 档
1	+	-	-	-	-	-
2	+	-	-	-	-	-
3	+	+	-	-	-	-
4	+	+	+	-	-	-
5	+	+	+	+	+	+

注:“-”表示加工直接短路;“+”表示正常加工。

2.2 沉积工艺对沉积层厚度的影响

不同电规准下,机床的输出脉宽和峰值电流各不相同,将表 1 中的输出档位换算成脉宽和峰值电流,对应的沉积层厚度见表 2。由表 2 可知,在正常加工状态下,脉宽对沉积层厚度的影响呈正相关变化。脉宽增大,单个脉冲的能量增大,离子通道持续的时间长,离子和电子撞击材料更充分,使得电极和工件的熔化量增大,在高温高压的状态下,熔化的材料相互渗透、扩散,从而沉积层厚度增加。电流对沉积层厚度的影响也呈正相关变化。峰值电流增大时,脉冲的能量也增大,单个脉冲使得工件和电极的熔化深度增大,电极元素过渡到工件上的量增加,从而沉积层厚度增加。

表 2 不同电规准下沉积层的厚度

Tab.2 Thickness of the sediments at different electric gauge

脉宽 / $\mu\text{s}$	沉积层厚度/ $\mu\text{m}$					
	3 A	7 A	10 A	13 A	16 A	19 A
8	5					
10	7					
20	17	17				
35	19	20	20			
80	25	35	36	39	45	50

2.3 沉积工艺对沉积层表面粗糙度的影响

不同电规准下,所得沉积层的表面粗糙度见表 3。由表 3 可知,脉宽和电流强度对沉积层表面粗糙度的影响都呈正相关关系,即随着脉宽或者电流强度的增大,粗糙度值增大。电流增大或者脉宽增大,都将使单个脉冲的能量增大,由电极和工件微小熔滴、正离子和电子组成的离子通道内粒子密度增大,在大能量脉冲作用下,离子通道内各种粒子的撞击作用更加强烈,在空气中沉积时,高温高压使空气等离子化,熔滴被等离子气流加速,冲击基体表面并向四周溅射,这将使每次放电时电极和工件上材料熔化的量和深度都增大,因此熔融冷凝后的粗糙度增大。

表 3 不同电规准下沉积层的表面粗糙度

Tab.3 Roughness of the sediments surface at different electric gauge

脉宽 / $\mu\text{s}$	沉积层表面粗糙度/ $\mu\text{m}$					
	3 A	7 A	10 A	13 A	16 A	19 A
8	1.2					
10	1.4					
20	1.8	2.6				
35	2.6	3.2	4.0			
80	3.2	3.4	4.5	4.8	5.0	4.9

2.4 大电规准对沉积层微观缺陷的影响

当脉宽为 80  $\mu\text{m}$  时,电流强度为 16 A 和 19 A 所得的沉积层较厚,在扫描电镜下放大 1000 倍的表面形貌见图 2。如图 2a 所示,电流强度为 16 A 的沉积层表面有微裂纹,部分区域轻微脱落,有微观孔隙。如图 2b 所示,电流强度为 19 A 的沉积层表面不仅有微裂纹,而且有局部烧伤,沉积层不致密,部分脱落,质量较差,故加工时不应选择这种电规准。电规准大

时,单个脉冲能量大,材料因迅速熔化而气化严重,在高温高压下,其中的一部分快速相互熔合、渗透,另一部分剧烈飞溅出离子通道,导致沉积层表面粗糙度大,局部烧伤,结合不够致密;同时电火花加工的瞬时高温和极速冷却使得沉积层内存在热应力,当热应力达到一定程度时,沉积层就会产生微裂纹,这些微裂纹的扩张使得沉积层发生部分脱落。电规准越大,这种现象越明显。有资料显示:在大电规准下添加保护气体能减少这些缺陷,气流量一定时能够得到最佳的沉积层。由于实验中的设备限制,在此不予讨论。

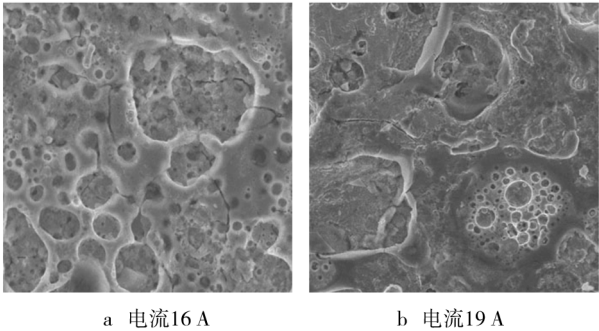


图 2 沉积层的表面微观形貌  
Fig.2 Microscopic morphology of the sediment coating

2.5 工艺优化

在进行电火花沉积的过程中,不能仅仅以提高沉积层的厚度和降低沉积层的粗糙度为目标,应该同时考虑到减少沉积层的微裂纹、烧伤、孔隙和脱落。为此,将各工艺参数对沉积层粗糙度、厚度和结合性的影响进行综合分析,最后确定选择脉宽 80  $\mu\text{s}$ 、电流 7 A 为最佳的沉积工艺参数。该参数条件下获得的沉积层放大 1000 倍的表面、截面形貌见图 3。

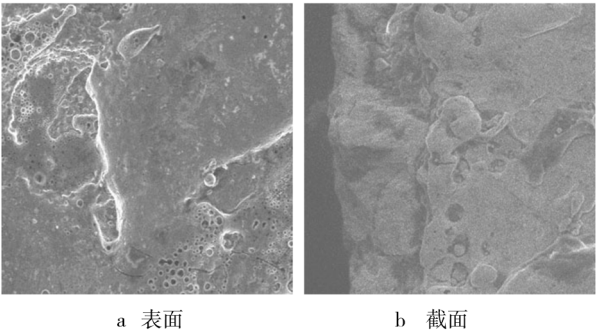


图 3 优化工艺所得沉积层的微观形貌  
Fig.3 Microscopic morphology of sediment coating obtained with optimal processing parameters

由图 3a 可见,沉积层表面光滑、致密,为细晶组织,无明显的微观缺陷。由图 3b 可见,沉积层与基体

结合处无明显界限,为冶金结合。沉积层经X射线衍射分析,其物相主要由(Fe,C)共熔体、 $W_2C$ 和少量W组成,此种特殊结构( $W_2C$ 及W)使得沉积层具有相当高的硬度,经检测,其平均硬度达到1000HV,是基体材料的2倍(基体材料硬度为400~500HV)。这是因为在强化过程中,工件表面生成的白亮层内除了会发生剧烈的冶金反应外,还相当于在进行表面局部淬火,其金相组织发生了马氏体向奥氏体的转变,从而产生了大量高硬度的 $W_2C$ 及其他合金结构<sup>[15]</sup>。此外还测得沉积层粗糙度 $Ra=3.4\text{ }\mu\text{m}$ ,厚度为35  $\mu\text{m}$ 。

### 3 结论

1) D703F高速电火花小孔加工机床更换极性后,能够进行表面沉积,适当调整工艺参数可以获得理想的沉积层。

2) 沉积层的粗糙度和厚度与电流、脉宽都呈正相关关系。在其他工艺参数不变的情况下,电流或脉宽增大,沉积层的粗糙度和厚度均增大。

3) 在本试验条件下,脉宽为80  $\mu\text{s}$ ,输出电流为7 A(即脉宽档为5,电流档为2)时可获得最佳的沉积层。该沉积层的粗糙度 $Ra=3.4\text{ }\mu\text{m}$ ,厚度为35  $\mu\text{m}$ ,硬度约为基体45钢的2倍。

### 参考文献

- [1] 彭兴礼,高应岑,朱宏军,等.机械再制造特种修复技术[M].北京:化学工业出版社,2011.  
PENG Xing-li, GAO Ying-cen, ZHU Hong-jun, et al. Machinery Remanufacturing Technology to Repair by Special Machining[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [2] 百基成,郭永丰,刘晋春.特种加工技术[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006.  
BAI Ji-cheng, GUO Yong-feng, LIU Jin-chun. Special Processing Technology[M]. Harbin: Harbin Industrial University Press, 2006.
- [3] 张燕,张行,刘朝辉,等.热喷涂技术与热喷涂材料的发展现状[J].装备环境工程,2013,10(3):59—62.  
ZHANG Yan, ZHANG Hang, LIU Zhao-hui, et al. Development Status of Thermal Spray Technology and Thermal Spray Material[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(3): 59—62.
- [4] 陈钟燮.电火花表面强化工艺[M].北京:机械工业出版社,1987.  
CHEN Zhong-xie. EDM Surface Strengthening Technology[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1987.
- [5] 张瑞珠,李静瑞,肖明.电火花微纳米涂层的研究与应用[J].表面技术,2013,42(2):108—111.  
ZHANG Rui-zhu, LI Jing-rui, XIAO Ming. Research and Application of Micro Nanostructured Coating by Electro-spark[J]. Surface Technology, 2013, 42(2): 108—111.
- [6] HO K H, NEWMAN S T. State of the Art Electrical Discharge Machining (EDM) [J]. International Journal of Machine Tool & Manufacture, 2003, 43: 1287—1300.
- [7] 王洪祥,张旭,高石,等.1Cr13不锈钢电火花表面强化层摩擦磨损性能研究[J].材料科学与工艺,2011,19(3):56—60.  
WANG Hong-xiang, ZHANG Xu, GAO Shi, et al. The Friction and Wear Properties of Strengthening Layer in EDM of Stainless 1Cr13[J]. Materials Science & Technology, 2011, 19(3): 56—60.
- [8] 何胜帅,陈立伟,强笑辉.航空发动机叶片高应力振动疲劳试验技术研究[J].装备环境工程,2013,10(4):41—46.  
HE Sheng-shuai, CHEN Li-wei, QIANG Xiao-hui. High Stress Vibration Fatigue Test Technology of Aeroengine Blade[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(4): 41—46.
- [9] 郭双全,冯云彪,何勇,等.未来航空发动机热障涂层材料及制备技术[J].表面技术,2012,41(5):119—123.  
GUO Shuang-quan, FENG Yun-biao, HE Yong, et al. Material and Fabrication Technique of Thermal Barrier Coatings for Future Aeroengines[J]. Surface Technology, 2012, 41(5): 119—123.
- [10] 王振民,黄石生,温瑾林,等.电火花表面强化技术发展概况[J].工具技术,2000,34(5):4—7.  
WANG Zhen-min, HUANG Shi-sheng, WEN Jin-lin, et al. Developing Status of Electric Spark Surface Hardening Technology[J]. Tool Engineering, 2000, 34(5): 4—7.
- [11] 李龙,刘会云,张心金,等.金属复合板表面处理技术的研究现状及发展[J].表面技术,2012,41(5):124—128.  
LI Long, LIU Hui-yun, ZHANG Xin-jin, et al. Research Status and Progress on Surface Preparation of Clad Metal Plates[J]. Surface Technology, 2012, 41(5): 124—128.
- [12] 陈伟伟,朱颖,康慧,等.电火花沉积技术国内外研究现状[J].焊接,2006(5):21—25.  
CHEN Wei-wei, ZHU Ying, KANG Hui, et al. Research Status of the Electro Spark Deposition[J]. Welding & Joining, 2006(5): 21—25.
- [13] 刘志东,高长水.电火花加工工艺及应用[M].北京:国防工业出版社,2011.



- zhou; Tribological branch, China Mechanical Engineering Society, 2007: 52—53.
- [4] 李刘合, 夏立芳, 张海泉, 等. 类金刚石碳膜的摩擦特性及其研究进展[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(1): 76—80.
- LI Liu-he, XIA Li-fang, ZHANG Hai-quan, et al. Tribological Properties and the Current State of Tribological Investigation of Diamond-like Carbon Films[J]. Tribology, 2001, 21(1): 76—80.
- [5] 吴行阳, 黄夏婧, 张建华. 非晶碳基薄膜及其表面织构化后的水润滑性能研究进展[J]. 表面技术, 2012, 41(4): 87—90.
- WU Xing-yang, HUANG Xia-jing, ZHANG Jian-hua. Progress in Water Lubrication of Amorphous Carbon Films and Surface Texturing[J]. Surface Technology, 2012, 41(4): 87—90.
- [6] 祝闻, 冉春华, 金义栋, 等. 掺 Ti 量对类金刚石薄膜机械性能的影响[J]. 表面技术, 2012, 41(5): 7—10.
- ZHU Wen, RAN Chun-hua, JIN Yi-dong, et al. The Effect of Ti Content on Mechanical Properties of DLC Films[J]. Surface Technology, 2012, 41(5): 7—10.
- [7] 武彬, 李骏, 张俊彦, 等. 类金刚石薄膜挺柱的制备与性能[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013, 43(1): 51—55.
- WU Bin, LI Jun, ZHANG Jun-yan, et al. Fabrication and Properties of Tappet with Diamond-like Carbon Film[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2013, 43(1): 51—55.
- [8] 李敬财, 何玉定, 胡社军, 等. 类金刚石薄膜的应用[J]. 新材料产业, 2004(3): 39—42.
- LI Jing-cai, HE Yu-ding, HU She-jun, et al. Application of Diamond-like Carbon Film[J]. Advanced Material Industry, 2004(3): 39—42.
- [9] 常同钦. 类金刚石膜的物理特性及应用[J]. 表面技术, 2006, 35(5): 76—78.
- CHANG Tong-qin. Physical Properties and Applications of Diamond-like Carbon Films[J]. Surface Technology, 2006, 35(5): 76—78.
- [10] 代明江, 付志强, 林松盛, 等. 摩擦条件对掺钨 DLC 膜摩擦磨损性能的影响[J]. 真空, 2010, 47(3): 1—4.
- DAI Ming-jiang, FU Zhi-qiang, LIN Song-sheng, et al. Effect of Frictional Conditions on Tribological Performance of W-doped DLC Films[J]. Vacuum, 2010, 47(3): 1—4.
- [11] 付志强, 王成彪, 岳文, 等. 钨含量和摩擦条件对掺钨 DLC 涂层摩擦性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(9): 1584—1588.
- FU Zhi-qiang, WANG Cheng-biao, YUE Wen, et al. Influences of W Content and Friction Condition on the Tribological Properties of W-Doped DLC Coating[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(9): 1584—1588.
- [12] 杨义勇, 彭志坚, 付志强, 等. 多组分缓冲层 W 梯度掺杂 DLC 复合薄膜研究[J]. 金属学报, 2010, 46(1): 34—40.
- YANG Yi-yong, PENG Zhi-jian, FU Zhi-qiang, et al. Study on W Graded Doping DLC Composite Films with Multicomponent Transition Layer[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(1): 34—40.
- [13] 王玲, 余志明, 魏秋平, 等. 不同过渡层对钢基金刚石薄膜的影响[J]. 中国表面工程, 2011, 24(1): 33—39.
- WANG Ling, YU Zhi-ming, WEI Qiu-ping, et al. Investigation of Diamond Films Deposition on Steel Substrates with Different Interlayers[J]. China Surface Engineering, 2011, 24(1): 33—39.
- [14] 李光, 孙跃, 夏立芳, 等. 类金刚石碳膜的摩擦学性能及摩擦机制[J]. 金属热处理, 2001, 26(10): 1—4.
- LI Guang, SUN Yue, XIA Li-fang, et al. Tribological Behavior and Mechanism of Diamond-like Carbon Films[J]. Heat Treatment of Metals, 2001, 26(10): 1—4.
- [15] 李振军, 徐洮, 李红轩, 等. 类金刚石薄膜的摩擦学特性及磨损机制研究[J]. 材料科学与工程学报, 2004, 22(5): 774—777.
- LI Zhen-jun, XU Tao, LI Hong-xuan, et al. Review on Tribological Properties and Wear Mechanisms of Diamond-like Carbon Films[J]. Journal of Material Science & Engineering, 2004, 22(5): 774—777.
- [16] 莫继良, 陈龙, 朱旻昊. WC/C 固体润滑涂层的滑动摩擦磨损性能研究[J]. 材料工程, 2008(8): 13—16.
- MO Ji-liang, CHEN Long, ZHU Min-hao. Friction and Wear Properties of WC/C Solid Lubricant Coating[J]. Journal of Materials Engineering, 2008(8): 13—16.

(上接第 100 页)

- LIU Zhi-dong, GAO Chang-shui. Machining Technology and Application of EDM[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011.
- [14] YE S L, SU J, JIA Z X, et al. Study on the Mechanism of High Speed Small Hole Drilling by EDM[J]. Materials Science Forum, 2004, 471/472: 302—306.
- [15] 亓利伟, 楼乐明, 李明辉. 放电通道的波动性与电火花加工原理[J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(7): 989—993.
- QI Li-wei, LOU Le-ming, LI Ming-hui. Mechanism of Electrical Discharge Machining and Wave Characteristics of Plasma Channel[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2001, 35(7): 989—993.