

硅电极电火花放电的表面改性技术研究

许家源, 董春杰, 张建华, 孙 博

(山东大学机械工程学院高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东济南 250061)

摘要: 采用单晶硅材料作工具电极, 选择合适的脉冲放电参数对碳素工具钢进行电火花表面强化, 在工件表面上形成一层硅及硅的化合物。研究表明, 表面硅化处理后的工件表面硬度、耐磨性和耐腐蚀性均明显提高, 可有效提高工件的性能和使用寿命。

关键词: 表面改性; 电火花加工; 硅

中图分类号: TG 661 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009—279X (2009) 06—0038—04

Surface Modification Technology of EDM with Silicon Electrode

Xu Jiayuan, Dong Chunjie, Zhang Jianhua, Sun Bo

(Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: A thin film of silicon and silicon compounds was coated on the surface of carbon tool steel workpiece by EDM with single crystal Silicon tool electrode and suitable processing parameters. Experimental results show that the modified surfaces are provided higher hardness, higher wear resistance and higher corrosion resistance, which are helpful for improving the workpiece performance.

Key words: surface Modification; EDM; silicon

在高速、高温、高压、重载、腐蚀介质等恶劣的工作条件下, 零部件材料的破坏往往自表面开始, 例如磨损、腐蚀、高温氧化等, 表面的局部破坏可能会导致整个零件失效, 从而导致设备停产^[1]。改善材料的表面性能能有效延长其使用寿命, 提高使用价值。因此, 表面工程技术不仅成为现代制造技术中重要的工艺方法, 而且在设备的技术改造和维修方面发挥着重要的作用。

表面强化处理技术包括电镀、渗碳、放电、物理气相沉积 (PVD)、化学气相沉积 (CVD)、激光表面处理、离子注入和电子束辐照, 以及利用化学转化膜技术等。在不同的使用环境中, 这些处理技术各有其优缺点, 其中电火花表面强化工艺是利用高能量密度的脉冲放电对工件表面进行强化处理, 通过脉冲火花放电作用将电极材料熔渗进金属工件的表层, 形成合金化的表面强化层, 从而使工件的物理化学和力学性能得到改善^[2~4]。电火花表面强化工艺

具有可处理复杂零件、硬化层硬度适当生产成本低等诸多优点^[1]。工件经电火花表面强化后强化层与基体材料的结合非常牢固, 不会发生剥落, 组织性能无变化, 工件不会退火和变形^[5]。

1 实验方案

实验目的: 获得最佳加工参数, 得到硬度、耐磨性等都有所提高的表面涂层。

实验材料为 T7 钢, 经测量, 其显微硬度平均值为 457 HV, 电极材料为单晶硅, 试验所用机床为 SF201 数控精密电火花成形加工机。采用正交试验法, 见表 1。

2 试验结果及分析

2.1 表面形貌

处理前的工件表面有许多研磨划痕 (图 1), 经处理后的工件试样表面划痕已消失 (图 2), 且形成了有别于基体材料的新材料涂层, 类似于一个一个的小圆饼的叠加涂覆。涂层表面光滑, 颜色近似为白色, 具有一定的光亮度。

收稿日期: 2009—07—13

第一作者简介: 许家源, 男, 1982 年生, 硕士研究生。

表 1 正交实验表

试验编号	时间/min	脉冲间隔/ μ s	脉宽/ μ s	峰值电流/A
1	10	10	2.4	0.8
2	10	13	4.2	2.4
3	10	18	5.6	5.6
4	5	10	4.2	5.6
5	5	13	5.6	0.8
6	5	18	2.4	2.4
7	15	10	5.6	2.4
8	15	13	2.4	5.6
9	15	18	4.2	0.8

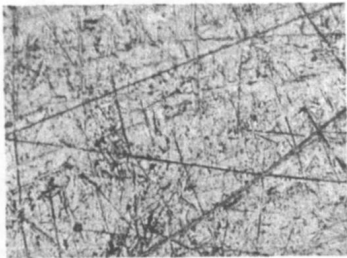


图 1 未处理的工件表面形貌(100×)

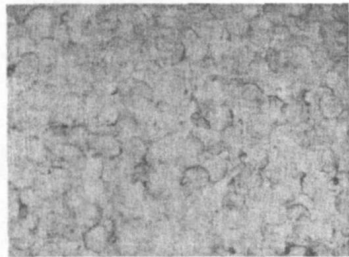


图 2 处理后的工件表面形貌(100×)

2.2 显微硬度测试

采用显微硬度计对工件表面涂层进行维氏硬度测量,加载力为 50 g,加载时间为 5 s,每个试样上均随机取3个部位打点测量,然后求平均值,结果见表 2。

表 2 显微硬度测量结果

试样	显微硬度 测量值 1	显微硬度 测量值 2	显微硬度 测量值 3	HV 显微硬度 平均值
1	669.72	634.2	588.56	630.83
2	755.09	738.34	754.41	749.28
3	787.45	802.91	757.14	782.50
4	741.65	710.18	737.02	729.62
5	617.24	569.35	675.45	620.68
6	715.18	736.37	725.98	725.84
7	683.01	756.46	725.98	721.82
8	803.66	699.12	739.66	747.48
9	623.33	613.23	633.68	623.41
基体材料	463.97	450.17	455.86	456.67

由表 2 可看出,试样表面硬度的平均值最小为 623.41 HV,比基体材料硬度平均值 456.67 HV 提高了 36.5%,试样表面硬度的平均值最大为 782.50 HV,比基体材料硬度测量平均值 456.67 HV 提高了 71.3%。

对表 2 中的试验数据进行分析,结果见表 3。

表 3 显微硬度正交实验分析结果

试样	加工时间/min	脉冲间隔/ μ s	脉宽/ μ s	峰值电流/A	表面硬度/HV
1	10	10	2.4	0.8	630.83
2	10	13	4.2	2.4	749.28
3	10	18	5.6	5.6	782.50
4	5	10	4.2	5.6	729.62
5	5	13	5.6	0.8	620.68
6	5	18	2.4	2.4	725.84
7	15	10	5.6	2.4	721.82
8	15	13	2.4	5.6	747.48
9	15	18	4.2	0.8	623.41
K ₁	2 076.14	2 082.27	2 104.15	1 874.92	—
K ₂	2 162.61	2 117.44	2 102.31	2 196.94	—
K ₃	2 092.71	2 131.75	2 1252	259.6	—
k ₁ (=K ₁ /3)	692.05	694.09	701.38	624.97	—
k ₂ (=K ₂ /3)	720.87	705.81	700.77	732.31	—
k ₃ (=K ₃ /3)	697.57	710.58	708.33	753.2	—
极差	28.82	16.49	7.56	128.23	—
优选方案	10	18	5.6	5.6	—

将涂层表面的硬度随各影响因素的变化情况用图形表示(图 3)。可以看出,对涂层表面显微硬度的影响程度,从高到低依次为峰值电流、加工时间、脉冲间隔、脉宽,其中脉冲间隔与脉冲宽度对涂层表面硬度的影响很小。根据各因素对实验结果的影响程度,选取峰值电流的第 3 水平、加工时间的第 2 水平、脉冲间隔的第 3 水平、脉宽的第 3 水平组成优选方案,恰好与试验编号 3 的方案相同,3 号试验方案获得的涂层表面硬度在 9 个试验方案中为最大,表明优选方案符合实际情况。

在试验条件范围内,随着加工时间的增加,表面涂层的厚度逐渐增加,其显微硬度逐渐增大。然而,当加工时间超过某一值时,随着加工时间的增加,涂层表面的硬度反而有所下降(图 3a)。因为过长的处理时间会使涂层表面质量变差,如出现疲劳裂纹及局部烧伤等,导致涂层表面显微硬度的降低;另一方面,采用正极性加工,在刚开始进行表面处理时,由于硅的导电性低于钢,硅电极材料容易涂敷到钢试样的表面,但随着处理时间的增加,试样表面逐渐

形成一层硅及硅的化合物(如 SiC 等硬度较高化合物)涂敷层,使工件与电极两者之间的导电性差别逐渐缩小,这也是导致表面涂层显微硬度下降的原因。

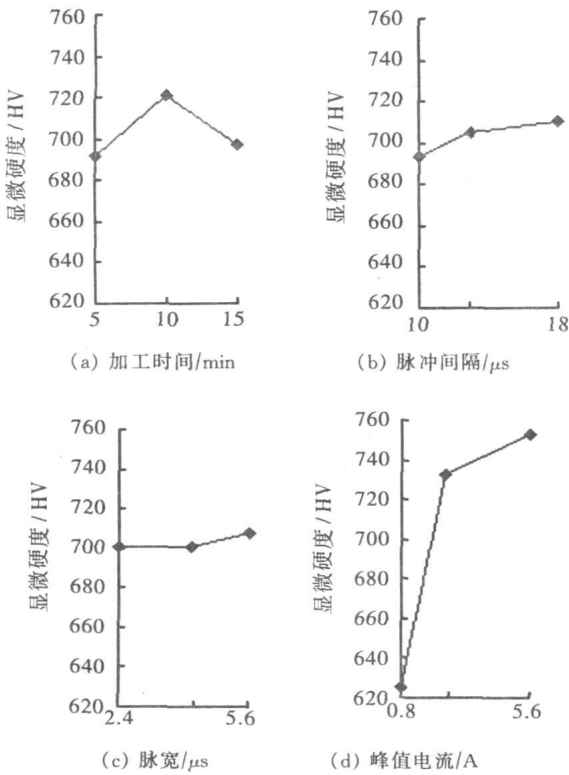


图 3 各因素对强化层显微硬度的影响曲线

2.3 涂层表面的耐磨性测试

选取 3 号试验方案的试样测试其耐磨性,并与未进行表面涂层处理的工件在同样条件下进行摩擦磨损对比实验。耐磨性能测试在 MRH-3 型高速环块摩擦磨损试验机上进行,采用环-块配副方式,其原理见图 4,对磨环材料为 45 钢,硬度为 38~45 HRC,外径 50 mm,内径 35 mm,高度 10 mm,表面粗糙度 Ra 为 $0.2\ \mu\text{m}$ 。施加的法向载荷为 60 N,转

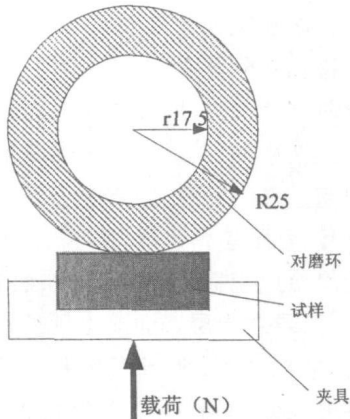


图 4 摩擦磨损实验原理图

速为 $200\ \text{r/min}$,实验环境温度为 $25\ ^\circ\text{C}$ 。试样的磨损量采用体积法测量,可根据式(1)计算得出。

$$V=B^{\circ}[R^2\arcsin\frac{a+b}{4R}-\frac{a+b}{4}\sqrt{R^2-(\frac{a+b}{4})^2}]$$

式中: B 为磨痕宽度,mm; a 、 b 分别为图 5 中所示的磨痕尺寸,mm。

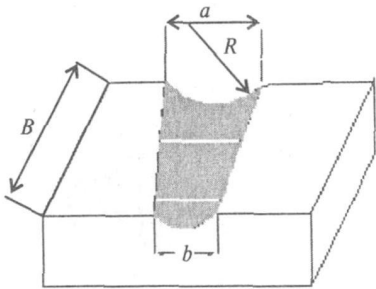


图 5 试样磨痕尺寸示意图

每隔 10 min 测量一次磨损量,测试结果见图 6。试验结果表明,3 号试样涂层表面 50 min 的磨损量只相当于基体材料 30 min 的磨损量,这是由于涂层含有 SiC 等硬度较高的化合物,使其耐磨性得到明显提高。

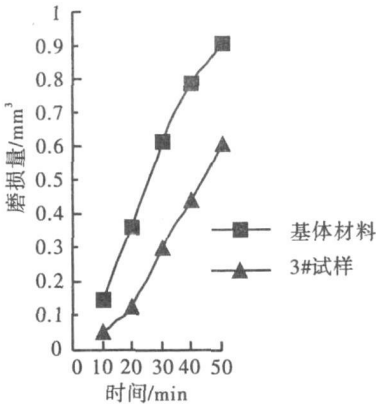
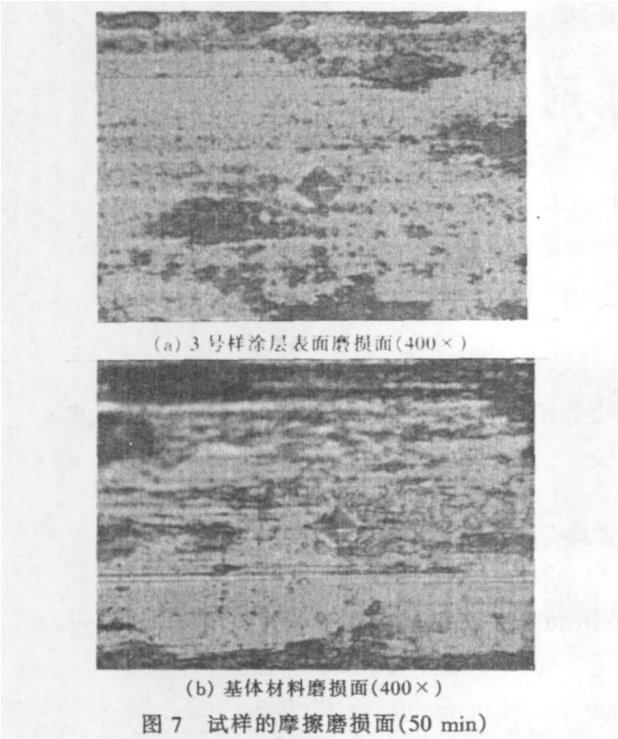


图 6 基体材料与 3 号试样涂层表面的摩擦磨损实验结果

图 7 为摩擦磨损试验进行 50 min 后的试样显微照片,基体材料磨损面的显微硬度测试值为 431.04 HV,3 号试样磨损面的显微硬度测试值为 620.31 HV,这表明 3 号试样经过 50 min 的摩擦磨损试验后,表面硬化涂层仍然存在。

2.4 耐腐蚀性能测试

将 3 号试样及基体材料试样放置于浓度为 15% 的盐酸中,4 h 后进行分析和观测。在 100 倍显微镜下观察,基体材料试样由于表面腐蚀过于严重,反射到目镜的光线极其微弱而无法观察其表面形貌。放大至 400 倍,且灯光调至最亮时,可见几个亮点,但仍无法清楚地观察其微观形貌(图 8)。

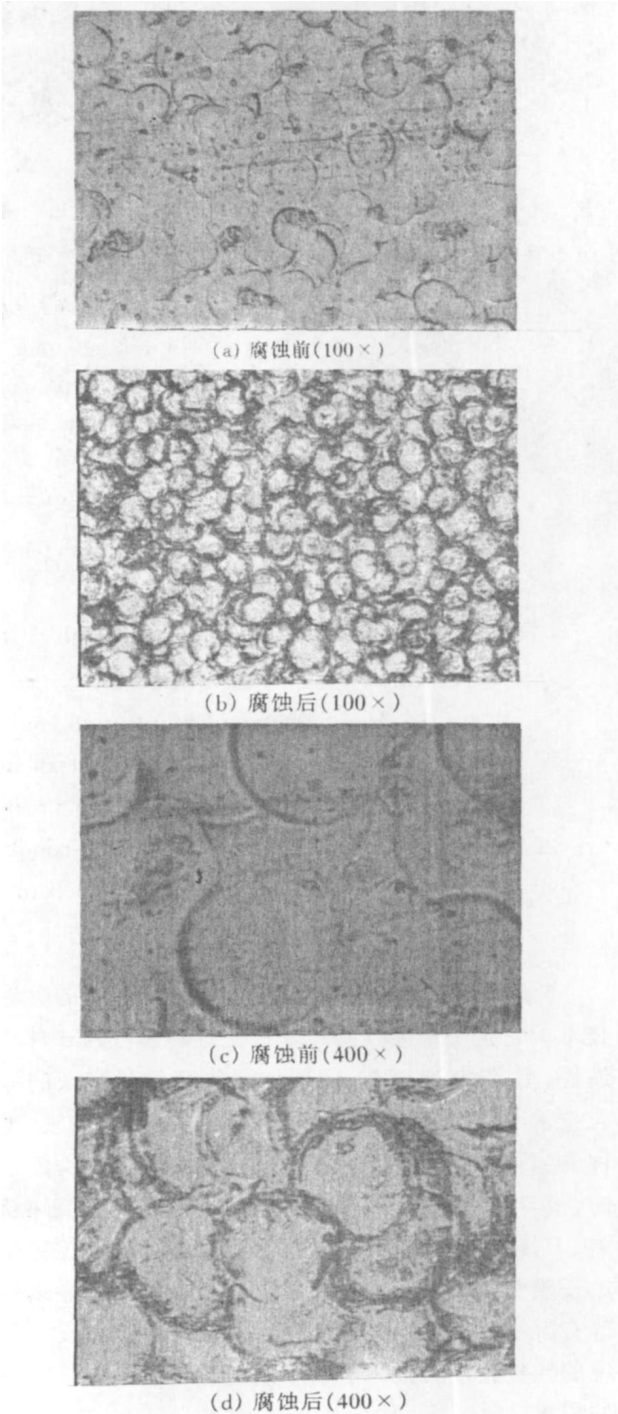


试验结果表明,圆饼状的强化点在腐蚀前清晰可见,经过 4 h 的腐蚀后仍可分辨,但强化点的边界处已产生了腐蚀现象,其他部位较完好,这表明腐蚀从强化点边界处开始。

实验结果表明,利用硅电极电火花脉冲放电进行碳素工具钢表面强化,可显著提高其耐腐蚀性能。碳素工具钢的主要成分是 Fe,而 Fe 是较活跃的金属,腐蚀电位较低,易被腐蚀。实验用的基体材料碳素工具钢的含碳量达 0.7%,由于 Fe 和 C 的电位不同,在与同一种介质接触时形成电偶,造成接触处的局部电偶腐蚀。经硅电极电火花表面涂层处理后,在碳素钢基体表面上形成了一层致密的含硅及硅化合物的强化层,由于硅元素性能稳定,不易被腐蚀,故其耐腐蚀性能明显提高。

3 结论

(1) 采用硅电极电火花脉冲放电进行碳素工具钢表面强化处理时,各因素对涂层表面显微硬度的影响程度从高到低依次为:峰值电流、加工时间、脉冲间隔、脉宽,其中脉冲间隔与脉宽对表面硬度的影响很微弱。涂层表面的显微硬度随着峰值电流的增大呈先增加后降低的趋势,随着加工时间的增加也呈现先增加后降低的趋势。在本文的实验条件下,最佳加工参数为:峰值电流 5.6 A、加工时间 10 min、脉冲间隔 18 μs、脉宽 5.6 μs。



(2) 经过硅电极电火花脉冲放电表面处理的碳素工具钢表面硬度显著提高。在本文的实验条件下,测得的最佳显微硬度平均值为 782.5 HV,比基体材料的显微硬度平均值 456.67 HV 提高了 71.3%。

(3) 采用硅电极电火花脉冲放电表面处理的碳素工具钢,其表面形成了含有 SiC 等硬度较高化合物的强化涂层,耐磨性能显著提高。

(下转第 44 页)

软件。而利用 VERICUT 机床部件干涉检查的功能,将电极的运动过程与设计模型进行比较,及时发现干涉问题,可实现电极运动自动编程。如图 2 所示,通过反复调整,获得电极可导入零件的最大间隙,使电极导入区域相对开阔,减少干涉的可能性。

在 VERICUT 仿真环境^[2]里面使用 MDI 方式手动编程,根据日志文件反馈信息,调整程序,取代相当繁重的现场手工调试程序的工作。并可根据模拟仿真的结果,及时调整电极结构和尺寸,得到的叶盆加工电极导入程序片段:

```
.....
Z-6X35 Y0C-30
X25 C-23
X20 Y6C-15
X15A-12 Y10
X10
C-5
.....
```

使用模拟仿真的方法,解决了电极在 5 轴联动环境下切入、退出零件内腔,运动到理论位置的难题。随后又对电火花加工运动机理进行研究,解决了叶背、叶盆、流道及轮盖内壁电极运动加工轨迹的跟踪和模拟,使原来电火花加工的手工编程一举转为自动编程,并对电极与零件的间隙进行了有效控制,为获得电极的真实放电间隙,创造了有利条件。电极一次装夹,即可完成零件型腔内全部型面的加工,保证了加工精度,免去了电极的找正时间,极大地提高了工作效率。

在加工中,我们发现在电极与主轴夹持的远端部位,加工出的零件尺寸有偏差,经分析是电极的刚性不够。基于上述理论与方法,通过逐步增大和调节电极的厚度和宽度,并在仿真的环境下,寻求最佳电极尺寸,从而达到增强电极刚性的目的。数控编程和虚拟仿真的流程见图 4。

3 结束语

应用虚拟仿真技术编制 5 轴联动运动程序,程序稳定可靠,效率高,无干涉和过切问题,有效地避免了机床和电极、零件之间碰撞事件的发生,保证了产品的质量。

采用虚拟仿真技术可辅助工程技术人员进行电极结构和尺寸设计,使之更加趋于适合工程需求。

在电火花成形铣工艺中引入虚拟仿真技术,适

应了新产品试验阶段频繁调整程序和更改加工路线的需求。可节省编程与试切时间,缩短了零件的研制周期,降低了产品的生产成本。

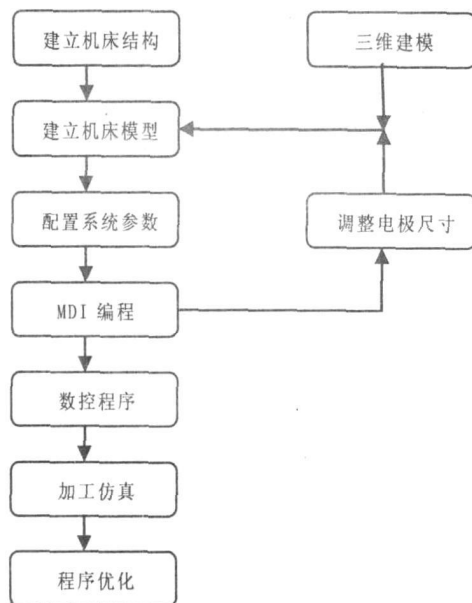


图 4 虚拟仿真的流程图

虚拟仿真技术在电火花成形加工中的成功应用,为特种加工应用虚拟仿真技术开辟了一条新思路。对于提升企业的数字化制造技术提供了有效的手段。

参考文献:

- [1] 欧阳承. Vericut 仿真技术在整体座舱骨架加工中的应用[J]. 航空制造技术, 2005(12): 38-40.
- [2] 李云龙, 曹岩. 数控机床加工仿真系统 VERICUT[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2005.

(上接第 41 页)

(4) 采用硅电极电火花脉冲放电表面处理的碳素工具钢表面的耐腐蚀性比基体材料明显提高。

参考文献:

- [1] 陈长军, 王东生, 郭文渊. 电火花表面强化处理研究进展[J]. 航空工程与维修, 2003(4): 36-37.
- [2] 陈钟燮. 电火花表面强化工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [3] 潘国顺, 周萼, 工捧柱. 脉冲放电表面强化工艺及强化层性能的研究[J]. 电加工, 1997(4): 30-32.
- [4] 罗洪军, 黄小鸥, 徐林. 电火花堆焊在机器零部件修复上的应用[J]. 新技术新工艺, 1995(4): 18-19.
- [5] 钱苗根, 姚寿山, 张少宗. 现代表面技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.