

单晶硅电火花铣削电极表面覆盖效应研究

刘志东 鲁清 邱明波 田宗军 黄因慧

南京航空航天大学, 南京, 210016

摘要:对单晶硅电火花铣削过程中电极表面出现的覆盖层进行了分析, 分析结果表明, 该覆盖层的主要成分是 SiO_2 。实验证明, SiO_2 是加工过程中电化学反应的产物。研究了电参数对 SiO_2 覆盖层厚度的影响规律。研究结果表明, 可以通过控制 SiO_2 覆盖层的厚度来保护电极和补偿电极损耗, 实现低损耗甚至无损耗的单晶硅电火花铣削加工。

关键词:单晶硅; 电火花铣削; 电极损耗; 覆盖效应

中图分类号: TG662

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2012.02.018

Study on Electrode Covering Effect on Monocrystalline Silicon in Electrical Discharge Milling

Liu Zhidong Lu Qing Qiu Mingbo Tian Zongjun Huang Yinhu

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

Abstract: Electrode covering effect on monocrystalline silicon in electrical discharge milling was analyzed and the covering material was SiO_2 . The SiO_2 cover was proved to be generated from some electrochemical reactions during the process. The effects of electrical parameters on the covering thickness were researched, and electrical discharge milling of low or even no electrode wear can be realized by controlling the covering thickness to compensate for electrode wear.

Key words: monocrystalline silicon; electrical discharge milling; electrode wear; covering effect

0 引言

单晶硅因其具有独特的电学性质, 是尖端科学技术中应用最为活跃的材料之一。为满足应用要求, 需在单晶硅基体上加工出许多复杂形状的小槽、型腔^[1-3], 但由于单晶硅具有脆性高、断裂韧性低等特性, 故利用传统加工方法加工十分困难。

袁根福等^[4]通过控制激光束的输入能量、扫描速度和重复频率等参数, 实现了激光扫描技术对单晶硅的铣削加工, 但激光加工的成本很高, 并且表面质量也较难控制。电火花加工方法通过电蚀作用来去除材料, 加工时与工件没有宏观接触力, 十分适合加工硬脆的半导体^[5-7], 但加工过程中的电极损耗会直接影响加工精度, 使该方法在实际应用中受到较大限制^[8-10]。

对金属进行负极性电火花加工, 当使用碳氢化合物液体介质时, 电极表面会形成一定厚度的覆盖层, 对工具电极起到保护作用, 可减少电极损耗^[11]。以水为工作液, 采用正极性加工 P 型单晶硅时^[12], 不会出现上述提及的“覆盖层”。但试验中发现此时电极表面也会有覆盖层, 而该覆盖层的存在对于降低单晶硅电火花铣削过程中的电极损耗甚至实现无损耗加工具有重要的意义。

1 电极表面覆盖效应的产生

为了研究单晶硅电火花铣削电极表面覆盖效应的产生及规律, 进行了如下实验: 实验原理如图 1 所示, 加工条件如表 1 所示。加工前对单晶硅表面进行打磨处理, 以去除表面钝化层, 并在进电点涂覆碳浆以减小接触电阻, 将铜片作为进电块。

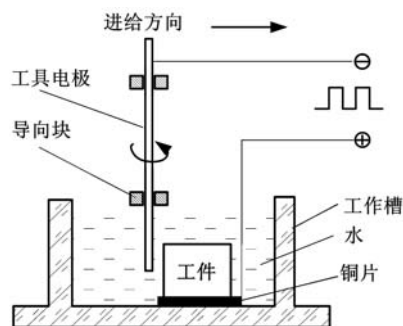


图 1 表面覆盖效应实验原理图

表 1 单晶硅电火花铣削加工参数

项目	内容
电极	$\phi 0.18\text{mm}$ 钼丝
工件	P 型单晶硅 ($4.7\Omega \cdot \text{cm}$)
工作液	自来水
电压 (V)	70
脉宽 (μs)	24
占空比	1 : 30
电极转速 (r/min)	5000
加工时间 (h)	1
加工方式	浸液式

利用 SEM 技术对实验后的钼丝电极进行分析, 发现加工后钼丝表面存在白色覆盖物, 如图 2 所示。图 3 为加工电极 SEM 放大照片, 表 2 所示为电极表面白色覆盖物质 EDS 元素分析结果。

收稿日期: 2011-02-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50975142); 江苏省科技支撑计划资助项目 (BE2009161), 江苏省博士后基金资助项目 (1002009C)

发现电极表面存在 Si、O、Mo、Mg、Ca、Cu 元素,其中, Si 元素的质量分数为 25.82%, O 元素的质量分数为 45.23%, Mo 元素的质量分数为 8.72%, 白色物质中, Si 元素和 O 元素是其主要组成部分。元素分析表中出现了少量 Mo 元素是因为扫描电镜射线穿透覆盖层触及钼丝所致, 而 Mg、Ca、Cu 元素是由于水中部分离子残留在电极表面所致。

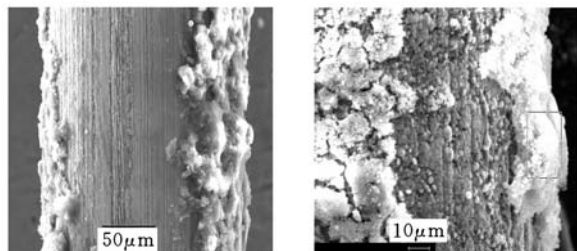


图 2 钼丝电极 SEM 照片 图 3 电极 SEM 放大照片

表 2 电极 EDS 元素的质量分数 %

元素	质量分数	元素	质量分数
O	45.23	Mo	8.72
Mg	13.26	Ca	3.10
Si	25.82	Cu	3.88

2 电极表面 SiO₂ 产生的机理

钼丝表面的 SiO₂ 是放电过程中蚀除产物飞溅所致, 还是其他电化学作用的结果呢? 为判断其产生的原因, 分别选择水和煤油进行实验。

以绝缘性能较差的水作为加工介质时, 放电加工过程必然存在一定的电化学作用, 而以绝缘性能很好的煤油作为加工介质时, 加工中存在热分解作用, 电化学作用、热分解作用均会对电极损耗产生一定的影响。第一组实验的加工介质为水, 第二组实验的加工介质为煤油, 其他加工参数相同。实验中, 在距离加工位置 30mm 处并联一根钼丝, 使加工中的蚀除产物不会飞溅沉积到并联钼丝的表面上, 以排除飞溅作用的影响, 实验原理如图 4 所示。

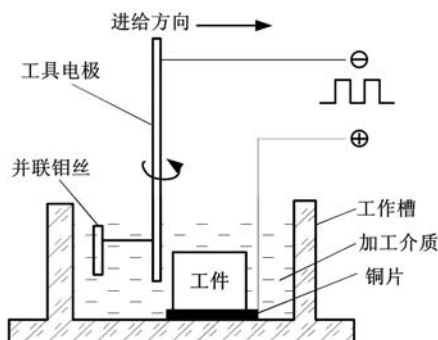


图 4 SiO₂ 产生机理实验原理图

加工 1h 后, 取出在水和煤油中加工的电极及与它们并联的钼丝。观察发现, 水中工具电极和

并联钼丝的表面均有白色物质产生; 煤油中工具电极和并联钼丝的表面均未发生变化。由此可知, 水作为工作介质时, 距离加工区域较远的并联钼丝上白色物质的产生说明该物质不是蚀除产物飞溅所致, 而是由水中发生的电化学反应所致。

图 5、图 6 分别为加工 1h 后水和煤油中并联钼丝的 SEM 照片。观察图 5 可以知, 以水为工作液时, 并联钼丝表面被大量白色物质包裹, 通过元素分析发现物质主要含有 O、Si、Mo 元素。由表 3 中元素的质量分数可知, 包裹物主要为 SiO₂ 和 Si 的混合物, 说明以水为工作液时有 SiO₂ 沉积到并联钼丝上。观察图 6 可以看到, 煤油中并联钼丝上没有出现物质的堆积, 通过元素分析发现其表面组织含 C、O、Mo 元素, 没有 SiO₂, 如表 4 所示。表面存在 C 元素是因为煤油在加工时发生热分解作用, 析出的 C 沉积到并联钼丝上所致。

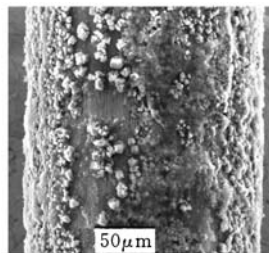


图 5 水中并联钼丝 SEM 照片

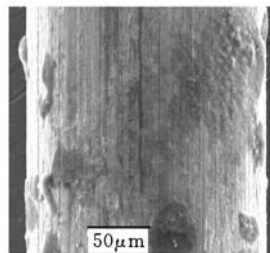


图 6 煤油中并联钼丝 SEM 照片

表 3 水中并联钼丝 EDS 元素的质量分数 %

元素	O	Si	Mo
质量分数	24.73	48.63	26.65

表 4 煤油中并联钼丝 EDS 元素的质量分数 %

元素	C	O	Mo
质量分数	32.59	10.71	56.70

实验过程还发现, 将水作为工作介质加工时, 并联钼丝周围会出现很多小气泡, 而在煤油中加工时, 电极周围没有气泡出现。

以水为工作液, 在电火花铣削单晶硅的过程中, 部分蚀除产物被氧化成 SiO₂。由于使用的工作液是水, 在水中会有部分电离的 H⁺ 和 OH⁻, SiO₂ 胶团吸附 H⁺ 后向阴极迁徙, H⁺ 在工具电极表面获得电子形成 H₂, SiO₂ 便沉积在工具电极上, 这样就会在工具电极表面形成气泡和 SiO₂ 覆盖层。当使用煤油作为工作液时, 由于煤油中没有电离的离子, 所以没有电化学反应, 也不会有 H⁺ 承担输送 SiO₂ 的作用, 因此电极表面不会出现 SiO₂ 沉积, 同样也不会有气泡产生。

3 电参数对表面 SiO₂ 覆盖层厚度的影响

为了提高电火花铣削的加工精度, 既要降低

加工过程中的电极损耗,同时也要控制电极表面覆盖层的厚度。因此需要通过控制加工参数,使电极表面 SiO_2 覆盖层的生成与蚀除达到一种动态平衡,最终使电极在加工过程中的直径基本保持不变,实现高精度的电火花铣削加工。

选择了几组参数进行了单晶硅电火花铣削加工,实验采用单项参数变量法进行,并分别测量了加工后钼丝的直径。

3.1 不同电压下加工后电极的直径

当加工脉宽为 $24\mu\text{s}$,占空比为 1:30 时,分别测量在电压 70V 和 80V 下加工 1h 后的电极直径,如图 7 所示。在其他加工参数相同的情况下,加工电压越高,加工后钼丝的直径越小。这是因为加工电压变大,放电电流变大,导致单个脉冲放电能量的增加,电极损耗增加,所以电极直径变小。

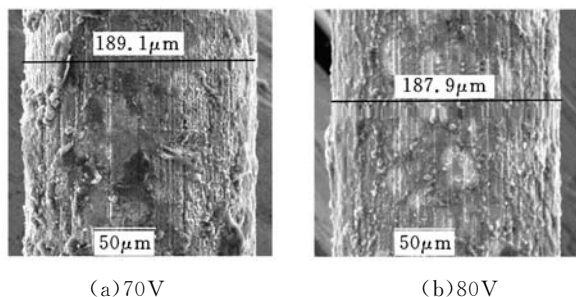


图 7 不同电压下加工后电极丝直径

3.2 不同脉宽下加工后电极的直径

当加工电压为 70V,占空比为 1:30 时,分别测量脉宽为 $12\mu\text{s}$ 和 $40\mu\text{s}$ 下加工 1h 后的电极直径,如图 8 所示。在其他加工参数相同的情况下,加工脉宽越大,加工后钼丝的直径越大。这是因为脉冲宽度增加,单位时间内脉冲放电次数减少,电极损耗减小。在实验中还发现,在加工电压较低、占空比较大的情况下,当脉宽继续增大到一定程度(脉宽大于 $48\mu\text{s}$)时,加工变得很困难,这是由于表面绝缘 SiO_2 覆盖层太厚,阻断加工回路,无法产生火花放电。

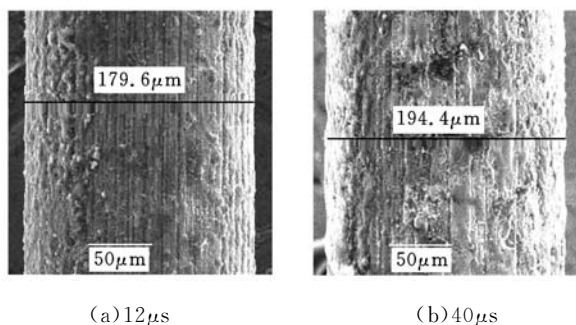


图 8 不同脉宽下加工后电极丝直径

3.3 不同占空比下加工后电极的直径

当加工电压为 70V,脉宽为 $24\mu\text{s}$,分别测量

在占空比为 1:10 和 1:20 下加工 1h 后的电极直径,如图 9 所示。在其他加工参数相同的情况下,加工占空比越大,加工后钼丝的直径越大。因为占空比的改变不会影响单个脉冲能量的大小,但占空比会改变放电频率,随着占空比的增大,相同时间放电击穿次数减少,导致钼丝损耗降低。

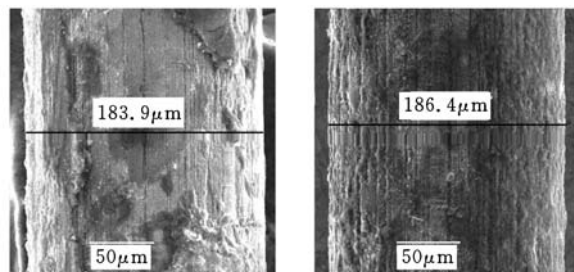


图 9 不同占空比下加工后电极丝直径

4 加工实例

采用三维电火花铣削工作平台对电阻率为 $4.7\Omega \cdot \text{cm}$ 的 P 型单晶硅进行加工,铣削出典型形状的井字形工件,如图 10 所示,加工参数如表 5 所示。

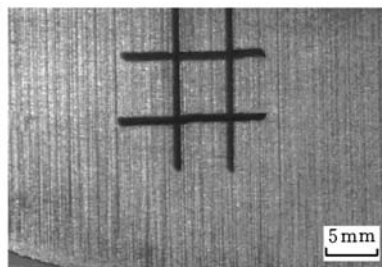


图 10 铣削的井字

表 5 单晶硅实际铣削加工参数

加工极性	电压 (V)	脉冲宽度 (μs)	占空比	电极转速 (r/min)	电极
正极性	120	24	1:30	5000	$\phi 0.18\text{mm}$ 钼丝

5 结论

(1) 单晶硅电火花铣削过程中,电极表面会发生电化学反应,形成 SiO_2 覆盖层。

(2) SiO_2 覆盖层会对电极损耗起到补偿作用,可以实现对单晶硅的低电极损耗甚至无损耗电火花铣削加工。

参考文献:

- [1] 蒋荣华,肖顺珍.我国半导体硅材料的发展现状[J].半导体情报,2001,38(6):31-35.
- [2] Bhagavat S, Kao I. Ultra-low Load Multiple Indentation Response of Materials: In Purview of Wiresaw Slicing and Other Free Abrasive Machining (FAM) Processes[J]. International Journal of Machine Tools

装配可靠性的动态贝叶斯网络建模与分析

张根保 刘 佳 葛红玉

重庆大学,重庆,400044

摘要:为了提高产品的整机可靠性,提出了可靠性驱动的装配技术(reliability driven assembly technology,RDAT)的概念。根据可靠性要求,首先利用结构分析和设计技术(structured analysis and design technique,SADT)对所装配产品进行功能分析,得到“元动作”粒度的 SADT 模型。然后采用具有时间特性的动态贝叶斯网络对 RDAT 进行了建模,将“元动作”级别的 SADT 模型转化为相应的动态贝叶斯网络模型。最后以某加工中心的托盘交换架进行实例分析,在装配产品和功能动作为多态系统的情况下,验证了该建模与仿真方法的有效性。

关键词:装配可靠性;动态贝叶斯网络;功能分析;多态系统

中图分类号:TH161

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.02.019

Modeling and Analysis for Assembly Reliability Based on Dynamic Bayesian Networks

Zhang Genbao Liu Jia Ge Hongyu

Chongqing University,Chongqing,400044

Abstract: For improving the reliability of products, a reliability driven assembly technology (RDAT) was presented. According to the requirements of reliability, structured analysis and design technique(SADT) was firstly applied to functioning analysis, then the last level of SADT model could be obtained. The dynamic Bayesian networks(DBN) which can depict the time was applied to modeling for RDAT, the SADT model was converted to corresponding DBN model. At last, while the system and functional actions were multi-states, the pallet changer of some machining center was taken as an example to verify the effectiveness of the model and simulation analysis method.

Key words: assembly reliability; dynamic Bayesian network; functioning analysis; multi-state system

0 引言

装配是将各种零部件组合在一起实现产品的

功能,是保证产品质量的重要环节。装配技术的研究目的在于以快速、可靠、低成本的方法在设计上实现产品的改善^[1]。国内外学者对装配过程的相关技术进行了许多研究。Yang 等^[2]用约束和自由度方法对虚拟装配技术进行了研究;邹冀华等^[3]建立了数字化技术的柔性对接装配技术体系,为大型飞机部件的对接装配提供了理论支持;文献^[4-5]讨论了协同装配技术的研究方法。由

收稿日期:2011-02-28

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2009AA04Z119);国家自然科学基金资助项目(50835008);国家科技重大专项(2009ZX04014-016;2009ZX04001-013;2009ZX04001-023;2010ZX04014-015);数字制造装备与技术国家重点实验室开放基金资助项目

and Manufacture,2007,47(3/4):666-672.

- [3] Bamberg E, Rakwal D. Experimental Investigation of Wire Electrical Discharge Machining of Gallium-doped Germanium[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 197(1/3): 419-427.
- [4] 袁根福,曾晓雁.单晶硅的激光铣削试验研究[J].激光技术,2003,27(5):163-165.
- [5] 赵万生.先进电火花加工技术[M].北京:国防工业出版社,2003.
- [6] 刘志东,汪炜,田宗军,等.太阳能硅片电火花电解高效切割研究[J].中国机械工程,2008,19(14):1673-1677.
- [7] 邱明波,黄因慧,刘志东,等.太阳能硅片制造方法研究现状[J].机械科学与技术,2008,27(8):1017-1020.
- [8] Fujino M, Okamoto N, Masuzawa T. Development of Multi-purpose Microprocessing Machine[C]//

Proc. of ISEM XI. Lausanne, 1995: 613-620.

- [9] Yu Z, Masuzawa T, Fujino M. 3D Micro-EDM with Simply Shaped Electrode[J]. Annals of the CIRP, 1997, 46(1): 1-8.
- [10] 刘光壮,杨晓冬.电火花铣削加工技术及其发展状况[J].电加工,1998(1):1-5.
- [11] 胡仁平.电加工中规则电极的保护层产生规律的仿真研究[D].上海:华东交通大学,2006.
- [12] 邱明波.半导体晶体材料放电加工技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2009. (编辑 张 洋)

作者简介:刘志东,男,1966年生。南京航空航天大学机电学院教授、博士研究生导师。主要研究方向为特种加工及机电一体化。发表论文80余篇。鲁清,男,1986年生。南京航空航天大学机电学院硕士研究生。邱明波,男,1982年生。南京航空航天大学机电学院博士后研究人员。田宗军,男,1971年生。南京航空航天大学机电学院教授。黄因慧,男,1945年生。南京航空航天大学机电学院教授、博士研究生导师。