

电容充放电脉冲数字控制型电火花沉积电源

韩红彪, 李向阳

(河南科技大学 机电工程学院, 洛阳 471003)

摘 要: 传统的电火花沉积电源由于放电电压不能连续调整, 导致电火花沉积应用范围受限、效率较低。针对这点不足, 研制了一台电容充放电脉冲数字控制型电火花沉积电源。该电源包括微处理器、整流滤波电路、充电及其驱动电路、充电电压比较电路、放电及其驱动电路、运动电极等。电源充电过程和放电过程交替进行, 可以对放电电压进行无级调整, 实现放电能量的无级调整, 放电频率也可无级调整。结果表明, 电源在电极与工件短路时, 可控硅仍能可靠关断, 放电参数调整方便, 适应各种工艺条件的要求。

关键词: 电火花沉积; 数字控制; 电压调整

中图分类号: TG178 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2014)03-0023-04

0 序 言

电火花沉积(electro-spark deposition, ESD)是一种脉冲微弧焊接过程, 将电容存储的电能在电极与基体之间瞬间高频释放, 通过火花放电作用将导电材料熔渗进金属基体表层, 形成合金化的表面沉积层, 从而使基体的物理性能、化学性能和力学性能得到显著改善^[1]。电火花沉积工艺是一种低应力、低变形的表面微焊接强化工艺, 可延长设备的使用寿命, 减少资源消耗, 具有很高的节能环保意义^[2], 得到的沉积层强化性能(包括硬度、耐磨性和抗氧化性等)显著提高^[3-6]。电火花沉积工艺操作简单, 生产成本低^[7], 而且对基体的热输入很小, 故不会导致基体的变形, 在工业中的应用日益广泛。脉冲电源直接影响到电火花沉积加工工艺的各项指标, 如加工速度、加工精度、表面粗糙度、沉积层综合性能等。近年来, 国内外一些专家和学者对电火花沉积电源进行了进一步的研究和改进, 在阳极端改用了旋转电极。改进的电火花沉积电源热输入量集中, 热影响区小, 由于瞬间形成高温达近万度以上, 可形成高熔点的复合强化层^[8, 9]。

但改进的电火花沉积电源仍存在放电电压不能连续调节、电极与工件短路时可控硅不能有效关断等问题, 严重影响了沉积效果。针对这些问题, 提出一种放电参数可控的脉冲数控型电火花沉积电源, 实现充电电压的无级调整和充放电脉冲的独立控制。

1 总体方案设计

作为电火花沉积/堆焊设备的核心部件, 脉冲电源控制着放电电压、放电频率等主要工作参数; 电源主要功能为控制电容按照设定的参数充放电, 实现对工件的沉积修复。电源应能够在大范围内调整放电电压、放电频率等各电参数, 方案设计如图1所示。该电源包括主电路、充电电压比较电路、控制电路。其中主电路包括交流调压电路、整流滤波电路、充电电路、放电电路和运动电极, 用于实现充放电的基本功能; 充电电压比较电路用来判断充电电压是否到达设定值, 当充电电压到达设定值后, 发出脉冲给控制电路停止充电, 实现充电电压的控制; 控制电路主要由数字控制电路、充电脉冲驱动电路、放电脉冲驱动电路、变电容驱动电路和运动电极驱动电路等组成, 控制充电与放电的交替运行以及对工作方式、放电频率、放电电压等工艺参数的显示和调整。

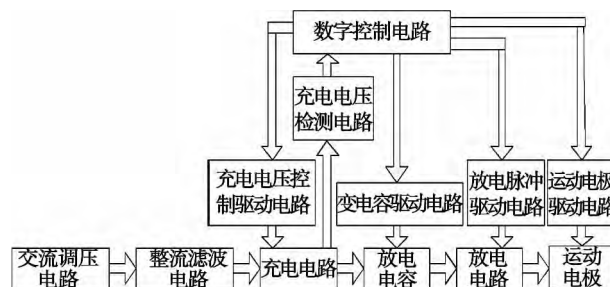


图1 脉冲数控型电火花沉积电源方案

Fig. 1 Scheme of electro-spark deposition power supply with digital control of pulse

2 硬件电路设计

设计的电源具体硬件电路如图 2 所示。

2.1 主电路设计

变压器 T1 二次侧输出 110 V 交流电; 经过整流

滤波电路转换为平滑的直流电后对电容组充电。充电电容由三组电容并联组成, 分别是 $C1 \sim C3$, $C4 \sim C7$, $C8 \sim C14$ 。每个电容的参数是 $20 \mu\text{F}/630 \text{ V}$ 。第二、三组分别由固态继电器 KS1 和 KS2 控制是否接入到放电电路中, 即可实现电容量 60, 140, 200 和 $280 \mu\text{F}$ 四档。通过控制接入主电路不同组数的电容

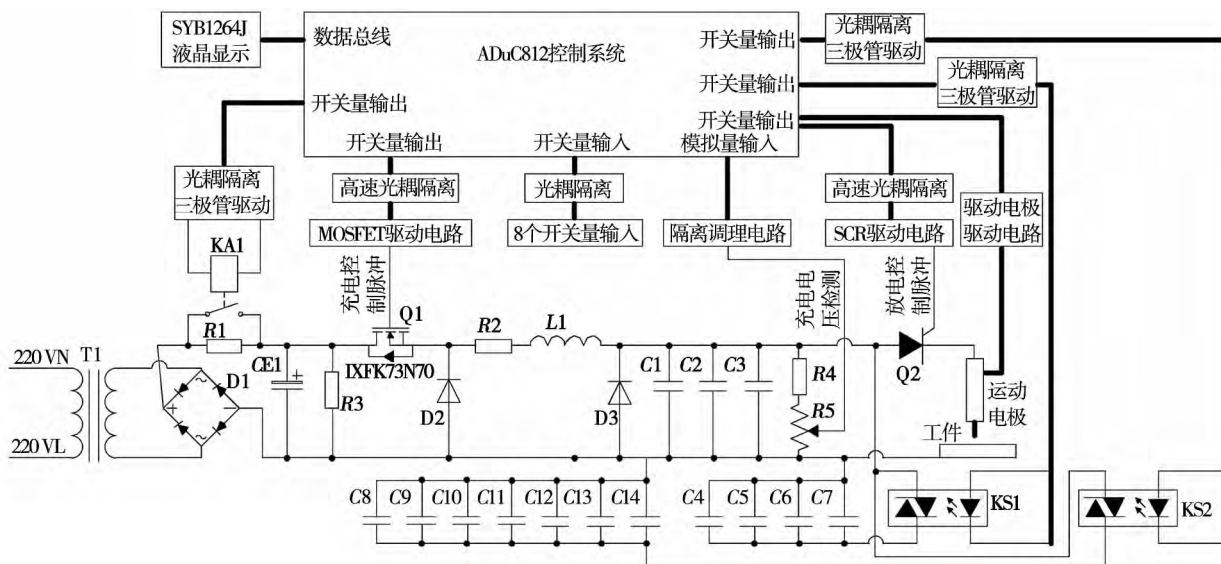


图 2 硬件电路原理图

Fig. 2 Schematic diagram of hardware circuit

来实现放电能量的调整。

T1 转化的 110 V 的交流电经过整流桥 D1 对电容 CE1 ($10\,000 \mu\text{F}/450 \text{ V}$) 充电。其中电阻 R1 实现电源软启动, 当 CE1 充满电后, KA1 工作, 其触点使 R1 短路。当电源断电后, CE1 上的电荷可通过 R3 释放掉。CE1 上的直流电可经过 MOSFET 管、电阻 R2、电感 L1 对放电电容 C1, C2, C3 等进行充电。电容在充放电时产生的反向电动势可通过快速二极管 D2, D3 进行消除。MOSFET 管选用 IXFK73N30, 当其导通时电容开始充电, 当其关闭时电容停止充电。当控制系统驱动可控硅导通时, 充电电容上的电能经过可控硅、运动电极与工件接触时进行电火花放电。当充电电容上的电能放完后可控硅自动关断。

2.2 控制电路设计

数字控制电路的 CPU 芯片是 ADuC812, 含有两个 12 位的数模转换器, 保证了电压控制的精度和速度。电路包括 8 路开关量输入输出电路、液晶显示电路、RS232 通讯电路、电源电路和复位电路等。按键信息可输入到 CPU, CPU 的开关量输出可控制固态继电器和运动电极的工作; 电源的工作参数和状态可通过图形液晶 SYB12864J 进行显示; RS232 通讯电路主要用于 ADuC812 的编程和与上位机的数

据通信; 由 CPU 输出的 MOSFET 管的驱动脉冲经过高速光耦和驱动芯片来控制 MOSFET 的通断; CPU 输出驱动脉冲经高速光耦和三极管的驱动来控制快速可控硅的通断。

2.3 充电电压比较电路设计

充电电压比较电路如图 3 所示。A 端、PE 端分别接在放电电容的正负两端, INT0 进入单片机外部中断口 INT0。D5, D6 为了防止比较器正负端电压差过大。

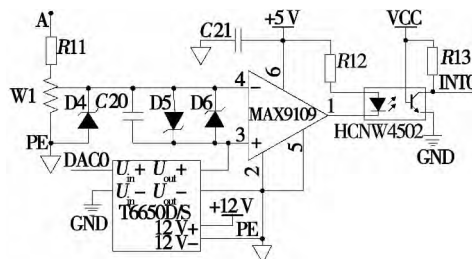


图 3 充电电压比较电路

Fig. 3 Charge voltage comparison circuit

A 端与 PE 端的电压即为电容充电电压, 通过电阻 R11 和电位器 W1 分压后输入到电压比较器负

端,调整电位器中间抽头使输入电压比较器负端的电压为充电电压的 $1/35$; 利用单片机 ADuC812 内部数模转换器 DAC0 的 8 位寄存器 DAC0L 的值 D_A ($0 \sim 255$) 控制输出电压 ($0 \sim 5 \text{ V}$), 该输出电压进入隔离放大器 T6650D/S 后到达 MAX9109 正端. 可以得出 D_A 的值与充电电压设定值 U_s 的对应关系为 $U_s = (D_A/255) \times 5 \times 35$, 即 $U_s = 0.6863 D_A$.

充电电压进入比较器负端与充电电压设定值进行比较. 充电电压未达到设定值时比较器输出高电平, 光耦不导通, INT0 为高, 这时要打开 MOSFET 管, 对放电电容进行充电; 当放电电压达到设定值时, 比较器输出变低电平, INT0 变为低. 即单片机外部中断口 INT0 的下降沿表示充电电压到达设定值, 此时关闭 MOSFET 管, 对放电电容停止充电.

3 电源工作原理

以电源的 MOSFET 管控制脉冲波形(图 4a)、可控硅的控制脉冲波形(图 4b)、电容的充放电电压波形(图 4c)、电火花放电脉冲波形(图 4d), 结合硬件电路来详细说明电源的工作原理.

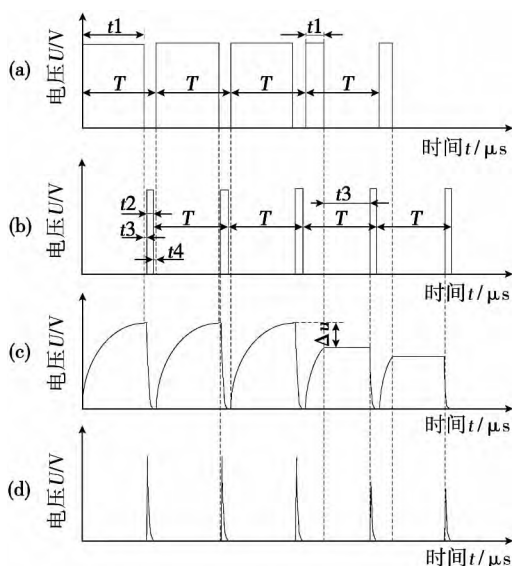


图4 控制脉冲和电容充放电工作波形

Fig. 4 Waveforms of control pulse and capacitance change-discharge pulse

MOSFET 管和可控硅的控制脉冲波形周期都是 $T = t1 + t2 + t3 + t4$. 其中 $t1$ 是控制 MOSFET 管的正脉冲时间, 也就是其导通对电容进行充电的时间; $t2$ 是控制可控硅的正脉冲时间, 也就是其导通进行火花放电的时间; $t3$ 是 MOSFET 管的正脉冲的下降沿到可控硅的正脉冲的上升沿的时间, 也就是 MOS-

FET 管关断到可控硅导通的间隔时间, 它可保证 MOSFET 管和可控硅不会同时导通; $t4$ 同样用来保证 MOSFET 管和可控硅不会同时导通; 由于电火花放电时间为 $3 \sim 5 \mu\text{s}$, 所以 $t2$ 为固定的 $5 \mu\text{s}$. $t4$ 也固定为 $5 \mu\text{s}$. $t1$ 和 $t3$ 随设定的频率和充电电压而变化. 在某一频率下, 当设定充电电压最大时, $t1$ 达到最大值, $t3$ 达到最小值 $5 \mu\text{s}$; 当充电电压设定值较小, $t1$ 变小, 为保证总周期 T 不变, $t3$ 相应增大 (如第四、五个工作周期). 电源产生电火花的频率的调节范围是 $10 \sim 1000 \text{ Hz}$, 电容充电电压的调节范围是 $10 \sim 155 \text{ V}$.

3.1 充电过程

如图 4 所示, $t1$ 为充电过程. 这段时间内 MOSFET 管导通, 电容开始充电, 电容电压不断升高, 放电脉冲未出现. 当电容充电电压达到设定值时, 电压比较电路 INT0 端产生下降沿, 单片机产生外部中断, 控制电路关闭 MOSFET 管, 充电结束. 在死区时间 $t3$ 内, 充电电压保持不变, 放电脉冲不出现.

3.2 放电过程

充电结束经过一个死区延时 $t3$ 后, 单片机发出控制脉冲, 快速可控硅在 $t2$ 时间内导通. 电容上的电能经过 KK100 型快速可控硅, 在运动电极与工件接触时进行电火花放电. 当放电电容上的电能放完后, 可控硅自动关断, 等待一个延时死区 $t4$ 后 MOSFET 管导通重新对电容开始充电, 进入下一个工作周期. 如此周而复始的循环就会不断产生电火花, 实现沉积/堆焊功能.

单个脉冲放电所释放的能量主要取决于放电电容容量和放电电压, 所以单个脉冲放电能量为

$$W_M = \frac{1}{2} C U_f^2 \quad (1)$$

式中: W_M 为单个脉冲放电能量; C 为放电电容量; U_f 为放电电压^[8]. 在这里假定放电结束时电容器上的剩余电压为零.

电容组有四档, 放电电压可任意调整, 进而实现了单个放电脉冲能量的无级调整. 电源充电电压为 $10 \sim 155 \text{ V}$, 电容量最小 $60 \mu\text{F}$, 最大 $280 \mu\text{F}$, 计算得单脉冲放电能量为 $0.003 \sim 3.36 \text{ J}$.

4 试 验

在电源各模块设计完成后对电源整体进行调试. 试验中的放电电压为 52 V , 电容为 $60 \mu\text{F}$, 由式(1)计算得出单个脉冲的放电能量为 0.081 J ; 工作频率为 100 Hz ; 电极材料选用不锈钢, 工件材料为 45 钢.

电容充放电的电压波形如图 5 所示. 电容在 a 点开始充电, 充电电压缓慢上升; 到 b 点达到 52 V 左右充电结束, 等待放电脉冲到来; 在 c 点开始放电, 电压瞬间变为零; 放点结束后, 电容继续充电进入下一个工作周期.

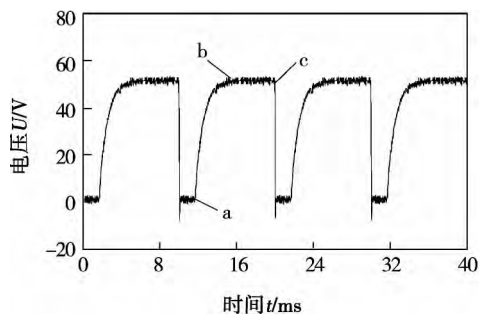


图 5 电容充放电的电压波形

Fig. 5 Voltage waveforms of capacitance in charge and discharge

当电极与工件接触力较大时, 接触电阻很小, 电极与工件直接短路, 图 6 为电极与工件短路时的放电波形. 由于可控硅可以可靠关断, 即使短路也会产生稳定的放电脉冲. 但产生的放电脉冲电压只有 5 V 左右, 在这种情况下不会发生电火花放电.

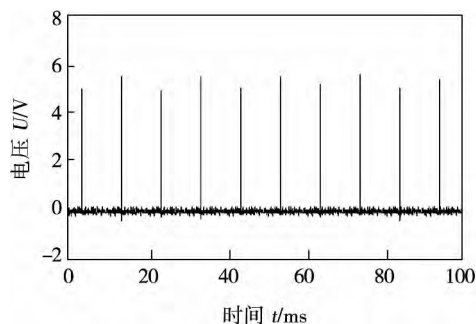


图 6 电极与工件短路时的放电波形

Fig. 6 Discharge waveform when electrode and work-piece is short-circuited

图 7 是正常工作时的电火花放电脉冲的电压波形, 其最高电压达到 16 V 左右, 明显高于电极与工件短路时的放电脉冲电压, 可以产生明显的电火花放电. 电源输出的放电周期是 10 ms, 而火花放电过程是在很短的时间内完成的, 放电脉冲很窄(放大可看到, 只有几个微秒), 与微弧放理论中认为的在电火花沉积过程中放电电流脉冲时间为 1 ~ 10 μ s 相符^[9]. 放电脉冲的电压和放电时间主要与充电电容的电压大小、充电电容的容量、电极与工件的接触电阻有关.

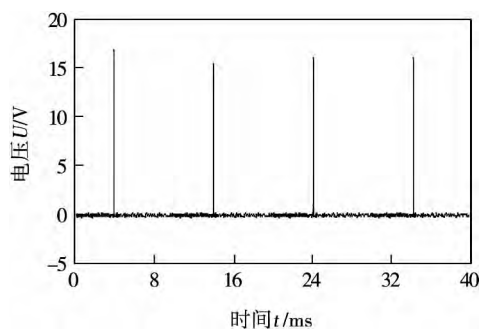


图 7 电火花放电脉冲的电压波形

Fig. 7 Voltage waveforms of elector-spark discharge pulse

5 结 论

(1) 主电路采用 MOSFET 管控制电容的充电过程, 采用可控硅控制电容的放电过程来产生电火花.

(2) 采用数字控制电路对电容的充放电脉冲实现了数字控制, MOSFET 管和可控硅交替导通, 电容充电过程和放电过程独立进行, 即使电极和工件短路时, 可控硅仍能可靠关断, 提高了脉冲输出效率.

(3) 电容的放电电压可无级调整, 实现了单个放电脉冲能量的无级调整, 具有按键输入和液晶显示, 放电参数调整方便, 可适应各种工艺条件的要求.

参考文献:

- [1] 郭 锋, 苏勋家, 李 平, 等. 铝合金表面电火花沉积层组织与性能[J]. 焊接学报, 2012, 33(4): 101-104.
Guo Feng, Su Xunjia, Li Ping, et al. Microstructure and properties of ESD coating on aluminum alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(4): 101-104.
- [2] 王建升, 孟惠民, 张瑞珠, 等. 铸钢轧辊电火花沉积 WC-4Co 涂层组织和性能分析[J]. 焊接学报, 2010, 31(10): 43-46.
Wang Jiansheng, Meng Huimin, Zhang Ruizhu, et al. Microstructure and properties of WC-4Co ESD coating of cast steel roll [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(10): 43-46.
- [3] 狄 平, 朱世根, 顾伟生. 电火花表面强化技术的研究进展[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 27(2): 110-113.
Di Ping, Zhu Shigen, Gu Weisheng. A review on electrosark surface strengthening technique [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2001, 27(2): 110-113.
- [4] Alexander V. The use of bipolar current pulses in electrosark alloying of metal surfaces [J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 168(2): 129-135.
- [5] Arvind A, Narendra B D. Synthesis of boride coatings on steel using high energy density process: comparative study of evolution of

[下转第 70 页]

(1): 24–27.

- [10] Hwang Yeongmaw , Kang Zongwei , Chiou Yuangcherng , *et al.* Experimental study on temperature distributions within the workpiece during friction stir welding of aluminum alloys [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture , 2008 , 48: 778–787.

[上接第 26 页]

- microstructure [J]. Materials Characterization , 1999 , 42(1): 31–44.
- [6] Lesnjak A , Tusek J. Processes and properties of deposits in electrospray deposition [J]. Science and Technology of Welding and Joining , 2002 , 7(2): 391–396.
- [7] 张 平 , 马 琳 , 梁志杰 , 等. 便携式电火花沉积镍基合金工艺 [J]. 焊接学报 , 2011 , 32(4): 32–36.
- Zhang Ping , Ma Lin , Liang Zhijie , *et al.* Technique of nickel based alloy coating produced by hand electric-spark depositing process [J]. Transactions of the China Welding Institution , 2011 ,

32(4): 32–36.

- [8] Gao Wei , Li Zhengwei. Nano-structured alloy and composite coatings for high temperature applications [J]. Materials Research , 2004 , 7(1): 175–182.
- [9] 陈钟燮. 电火花表面强化工艺 [M]. 北京: 机械工业出版社 , 1987.

作者简介: 李敬勇,男,1963 年出生,博士,教授. 主要从事新材料、有色金属及异种金属连接技术、新型焊接技术研究. 发表论文 40 余篇. Email: jingyong_li@126.com

作者简介: 韩红彪,男,1971 年出生,副教授,硕士研究生导师. 主要从事电火花沉积、数控技术、工业自动化设备方面的科研和教学工作. 发表论文 20 余篇. Email: lyhbb7157@163.com

this basis , a welding test was carried out by using the 80% Ar + 20% CO₂ mixture gas as protective gas. The results showed that the bypass arc burned stably on the oxide film of bypass droplet formed by CO₂ in protective gas , so the electromagnetic force and the gravity promoted the bypass metal transfer together and the size of the bypass droplet was significantly reduced.

Key words: gas metal arc welding; protective gas; metal transfer

Investigation on coupling arc electrode GPCA-TIG welding process

HUANG Yong^{1,2}, HAO Yanzhao², LIU Ruilin² (1. State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials , Lanzhou University of Technology , Lanzhou 730050 , China; 2. Key Laboratory of Non-ferrous Metal Alloys and Processing , The Ministry of Education , Lanzhou University of Technology , Lanzhou 730050 , China) . pp 19 – 22

Abstract: A new method named coupling arc electrode GPCA-TIG welding is proposed , which combines coupling arc electrode and GPCA welding method , and with which deep penetration and high-speed welding can be achieved. In this paper , the weld surface appearances and weld cross-section shapes with traditional TIG , coupling arc electrode TIG and coupling arc electrode GPCA-TIG welding are studied. It is found that in the coupling arc electrode GPCA-TIG welding , the weld undercut and humping bead can be avoided , and meanwhile the weld depth increase. The results of the coupling arc electrode GPCA-TIG process shows that the weld depth and width increase with the decreasing of weld speed and the rising of outer nozzle position; with the increasing of arc length and flow rate of the outer gas O₂ , the weld depth and width firstly increase and then decrease. The weld undercut is weaken with the increasing of welding speed , arc length and flow rate of the outer gas O₂. A good weld surface appearance can always be obtained with any outer nozzle position.

Key words: coupling arc electrode; GPCA welding; weld shape; weld undercut; humping bead

Digital control of capacitance charge-discharge pulse in electro-spark deposition power supply

HAN hongbiao , LI Xiangyang (School of Mechatronics Engineering , Henan University of Science and Technology , Luoyang 471003 , China) . pp 23 – 26 , 70

Abstract: The discharge voltage of traditional depositing power supply cannot be continuously adjusted , which limits the application range of electro-spark deposition and the efficiency of electro-spark deposition. In order to overcome this shortage , a digital control of capacitance charge-discharge pulse in electro-spark deposition power supply was developed. This power supply consists of CPU , rectifier and filter circuit , charge and its drive circuit , charge voltage comparison circuit , discharge and its drive circuit , motorial electrode , etc. With alternate charge and discharge process of this power supply , discharge voltage and discharge energy as well as discharge frequency can be adjusted steplessly. Experimental results show that the SCR of this power supply can be shut off safely when a short circuit occurs between the electrode and the workpiece , which greatly improves the effi-

ciency of pulse output. The adjustment of discharge parameters is convenient , thus the power supply meets the requirements of various process condition.

Key words: electro-spark deposition; digital control; voltage regulation

Synthesis and characterization of carbon nanotubes reinforced TiNi composite solder

QI Junlei , WAN Yuhan , ZHANG Lixia , FENG Jicai (State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China) . pp 27 – 30

Abstract: Low temperature PECVD method was employed for in-situ preparation of CNTs reinforced TiNi composite brazing powder on Ni-TiH₂ base material , in order to solve the problems such as poor dispersity of CNTs , poor structural integrity and reaction of C and Ti. The composite brazing powder was characterized by XRD , SEM , Raman and TEM. Analysis shows that the low temperature PECVD method has not only guaranteed the structural integrity and uniform dispersity of CNTs , but also inhibited the decomposition of TiH₂ at high temperatures and further inhibited the reaction between C and Ti , which realized the reinforcement of CNTs to TiNi brazing powder. The reinforcement of CNTs could release the residual stress in brazed joints , improve the properties of the joints and further achieve the reliable joining and high-temperature application of ceramic , composites and metal.

Key words: carbon nano tube; composite material; low temperature preparation; soldered seam

Plasticity and creep performance of low-Ag SnAgCuBi-xNi/Cu solder joint

YANG Miaosen , SUN Fenglian , ZOU Pengfei (School of Materials Science Engineering , Harbin University of Science and Technology , Harbin 150040 , China) . pp 31 – 34

Abstract: In order to study the effect of Ni on plasticity and creep performance of low-Ag SnAgCuBi-xNi/Cu ($x = 0 , 0.05 , 0.1 , 0.15 , 0.2$) solder joint , the indentation work and indentation creep were measured and analyzed by nanoindentation method. The results show that adding Ni could improve the hardness of solder joint. Adding amounts of 0.05% and 0.1% Ni is helpful to improve the plasticity performance but produce almost no impacts on creep. A further Ni adding amount (0.15% and 0.2%) can improve the creep resistance at the expense of plasticity. It is found that Ni can improve high temperature stability of SnAgCuBi/Cu solder joints. The creep resisting performance of the solder joints is improved with Ni element increasing after 400 h aging at 150 °C. The hardness of solder joints is improved with the Ni addition. The plasticity performance of solder joints with 0.1% Ni content is better than others.

Key words: nanoindentation; plasticity; creep; hardness

Finite element analysis of shot peening treatment to improve welding residual stress of 7A52 aluminum alloy

HUANG Zhiye , CHEN Furong (College of Materials Science and Engineering , Inner Mongolia University of Technology , Hohhot 010051 , China) . pp 35 – 40